

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Lukas Alves Cardozo Gandra

**REVITALIZAÇÃO DE FORNOS ELÉTRICOS A ARCO: processo de  
refrigeração**

Betim  
2025

LUKAS ALVES CARDOZO GANDRA

**REVITALIZAÇÃO DE FORNOS ELÉTRICOS A ARCO: processo de  
refrigeração**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

**Orientador:** Prof. Dr. Arthur Hermano Rezende Rosa

Betim  
2025

## FICHA CATALOGRÁFICA

G196r Gandra, Lukas Alves Cardozo

Revitalização de fornos elétricos a arco: processo de refrigeração / Lukas Alves Cardozo Gandra. – 2025.

51 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Arthur Hermano Rezende Rosa

1. Eficiência energética. 2. Forno elétrico. 3. Refrigeração. 4. Arco elétrico. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Gandra, Lukas Alves Cardozo. II. Título.

CDU: 681.5



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS  
Campus Betim  
Diretoria de Ensino  
Docentes Automação Industrial e Tecnologia da Informação  
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG  
3135976360 - www.ifmg.edu.br

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos seis dias do mês de agosto do ano de 2025, às **18:00**, nas dependências do **IFMG - Campus Betim**, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Arthur Hermano Rezende Rosa e demais membros, Wellington La Fontaine Lopes e Daniel Almeida Godinho. Nesta ocasião a discente LUKAS ALVES CARDOZO GANDRA do curso de **Bacharelado** em Engenharia de Controle e Automação, do IFMG - *Campus Betim*, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “REVITALIZAÇÃO DE FORNOS ELÉTRICOS A ARCO: processo de refrigeração” e foi **APROVADO** com nota de **90** pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o conseqüente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 15 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e conseqüente reprovação.

A sessão foi encerrada às **19:00 horas**. Para constar, eu, Arthur Hermano Rezende Rosa, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Betim, 07 de agosto de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Hermano Rezende Rosa**, Professor, em 07/08/2025, às 16:43, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Welinton La Fontaine Lopes**, Professor, em 07/08/2025, às 18:33, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Almeida Godinho, Professor Substituto**, em 10/08/2025, às 20:12, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

---



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2410530** e o código CRC **C204C419**.

---

23792.001240/2025-14

2410530v1

Ao meu pai, que me mostrou o caminho com firmeza,  
dedicação e direção.

À minha mãe, que me ensinou a percorrê-lo com cuidado,  
amor e propósito.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser minha força, esperança e sustento em cada etapa desta jornada. Sua presença foi essencial para que eu permanecesse firme nos momentos mais desafiadores.

À minha mãe, Rosilene, minha parceira, que sempre caminhou ao meu lado me oferecendo amor incondicional. Ao meu pai, José Geraldo, que me ensinou com sabedoria a ser homem, conduzindo a vida com leveza, esforço e dignidade. Sempre desejei ser motivo de orgulho para vocês, e este trabalho é reflexo do que me ensinaram.

Sou grato também aos meus irmãos, Thiago e Gabriela, que, junto aos meus pais, me mostraram o verdadeiro valor de uma família.

À minha namorada, Ana Beatriz, minha companheira de vida, que foi parceira nos momentos difíceis e inspiração para que eu persistisse. Sua presença e apoio foram fundamentais.

Agradeço ao meu orientador, Arthur Rosa, pelos ensinamentos, orientações e por compartilhar seu conhecimento durante o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa SMS Group, pela oportunidade de aprendizado e crescimento profissional. Em especial, agradeço ao meu antigo gestor, Fabrício Baêta, por seu incentivo na escolha do tema do TCC.

À instituição SENAI, pela confiança depositada em meu trabalho profissional e pelo conhecimento técnico e humano que agregou à minha formação.

Aos amigos e colegas de classe, que contribuíram com apoio mútuo, companheirismo e trocas enriquecedoras.

E por fim, mas não menos importante, meu agradecimento aos docentes desta Instituição, que me formaram como profissional desde o ensino técnico até o ensino superior. Este ciclo, iniciado em 2017 com o curso técnico, se encerra agora com um sentimento profundo de gratidão eterna.

“Não temas, porque eu sou contigo; não te assombres,  
porque eu sou o teu Deus; eu te fortaleço, e te ajudo, e te  
sustento com a destra da minha justiça.”

Isaías 41:10

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar a revitalização dos fornos elétricos a arco (FEA) com foco específico no processo de refrigeração. A pesquisa aborda a importância do resfriamento adequado dos painéis do forno, que são expostos a altas temperaturas durante a fabricação do aço, e analisa os métodos e tecnologias disponíveis para resolver este problema.

A metodologia utilizada inclui a revisão bibliográfica de trabalhos anteriores, análise dos sistemas de refrigeração existentes, e a proposição de melhorias baseadas em tecnologias avançadas.

**Palavras-chave:** Forno Elétrico a Arco; Refrigeração; Eficiência Energética; FEA; Arco Elétrico.

## **ABSTRACT**

This work aims to investigate the revitalization of electric arc furnaces (EAF) with a specific focus on the cooling process. The research addresses the importance of adequate cooling of furnace panels, which are exposed to high temperatures during steelmaking, and analyzes the methods and technologies available to solve this problem.

The methodology used includes a literature review of previous works, analysis of existing cooling systems, and a proposal for improvements based on advanced technologies.

**Keywords:** Electric Arc Furnace; Cooling; Energy Efficiency; EAF; Electric Arc.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais componentes. ....	13
Figura 2 – Etapas do processo. ....	16
Figura 3 – Transmissor de temperatura IFM TA2105. ....	21
Figura 4 – IO-Link Master IFM AL1303. ....	23
Figura 5 – Modelo 3D do FEA. ....	25
Figura 6 – Terminal para cabos à barra. ....	26
Figura 7 – Terminal para cabos à barra. ....	27
Figura 8 – Simbologia de ligação. ....	28
Figura 9 – Detalhe típico 1. ....	29
Figura 10 – Detalhe típico 2 e 3. ....	30
Figura 11 – Simbologia de ligação. ....	30
Figura 12 – Simbologia de ligação. ....	31
Figura 13 – Simbologia de ligação. ....	31
Figura 14 – Comparação de métodos. ....	33
Figura 15 – Painel tubular de refrigeração. ....	34
Figura 16 – Troca de calor no painel tubular. ....	35
Figura 17 – Painéis de refrigeração. ....	36
Figura 18 – Transmissor na tubulação em 3D. ....	37
Figura 19 – Zonas quentes. ....	38
Figura 20 – Cilindro e eixo. ....	39
Figura 21 – Túnel do FEA. ....	39
Figura 22 – Porta de escória. ....	40
Figura 23 – Diagrama P&ID. ....	41
Figura 24 – Distribuição do IO-Link Master. ....	43

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SEP	Sistema
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
FEA	Forno elétrico a arco
FP	Forno panela
CFD	Dinâmica dos fluidos computacional
EMI	Efeitos de interferência eletromagnética
NR	Normas Regulamentadoras

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\Lambda$	Lambda
$\zeta$	Letra grega minúscula zeta
$\xi$	Letra grega minúscula qsi
$\in$	Pertence

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1	Justificativa .....	11
1.2	Colocação do Problema .....	11
1.3	Objetivos .....	12
1.3.1	<i>Objetivo geral</i> .....	12
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	12
1.4	Organização do Texto .....	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>13</b>
2.1	Princípios de Funcionamento dos FEA .....	14
2.1.1	<i>Arco Elétrico</i> .....	14
2.1.2	<i>Regras de segurança</i> .....	15
2.2	Etapas do processo .....	15
2.2.1	<i>Carregamento - Charging</i> .....	16
2.2.2	<i>Ignição do arco elétrico - Ignition</i> .....	16
2.2.3	<i>Fase de penetração - Boring Phase</i> .....	17
2.2.4	<i>Fase principal de fusão - Main Melting Phase</i> .....	17
2.2.5	<i>Fase de Banho - Flat Bath Phase</i> .....	17
2.2.6	<i>Vazamento - Tapping</i> .....	17
2.3	Sistemas de Resfriamento .....	17
2.3.1	<i>Resfriamento a Cerâmica Refratária</i> .....	18
2.3.2	<i>Resfriamento por Água</i> .....	18
2.3.3	<i>Resfriamento por Ar Forçado</i> .....	19
2.4	Regulamentações .....	20
2.5	Revisão de Trabalhos Anteriores .....	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>21</b>
3.1	Materiais e Métodos .....	21
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>25</b>
4.1	Aterramento.....	26
4.2	Refrigeração por água.....	32

4.2.1	<i>Análise dos Sistemas de Resfriamento Atuais</i> .....	32
4.2.2	<i>Proposta de Melhoria</i> .....	34
4.3	<b>Quantidade de Placas</b> .....	36
4.4	<b>Projetos de Instrumentação</b> .....	37
4.5	<b>Meios de Comunicação</b> .....	42
5	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	44
5.1	<b>Trabalhos Futuros</b> .....	45
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	46

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do Forno Elétrico a Arco começou no século 19, com as primeiras experiências no uso de arcos elétricos. Em 1810, Sir Humphry Davy demonstrou a fusão de ferro com arco elétrico, seguido por Pepys em 1815, que o utilizou para solda. Em 1853, houve a primeira tentativa de desenvolver um forno de fusão elétrico, culminando na patente de Sir William Siemens em 1878/79. Em 1907, Paul Héroult instalou o primeiro forno comercial nos EUA, marcando o início de sua aplicação industrial. Após a Segunda Guerra Mundial, o FEA ganhou relevância devido ao menor custo de investimento em mini-usinas e à crescente demanda por aço (ALMEIDA, 2012). No pós-guerra, o aumento da disponibilidade de sucata impulsionou a adoção do FEA, especialmente na Europa, permitindo que novas siderúrgicas competissem com grandes usinas americanas na produção de produtos longos a custos menores.

A partir desse crescimento pós-guerra, a tecnologia vem se desenvolvendo cada vez mais e paralelo a isso a indústria siderúrgica tem enfrentado grandes desafios relacionados à eficiência energética e à competitividade global. Neste contexto, os fornos elétricos a arco (FEA) desempenham um papel crucial na produção de aço, contribuindo significativamente para a capacidade produtiva das siderúrgicas modernas. No entanto, os FEA são também uma área com grande potencial para melhorias significativas na eficiência operacional e na segurança.

Os fornos elétricos são amplamente utilizados na indústria siderúrgica devido à sua flexibilidade, velocidade de produção e menor impacto ambiental em comparação aos fornos a carvão pelo fato de reaproveitar materiais que seriam descartados. O processo do FEA tem como material inicial a utilização de sucatas para fusão elétrica do aço. Entretanto, a eficiência energética destes equipamentos continua a ser uma preocupação fundamental para as empresas deste setor, especialmente em um contexto em que a sustentabilidade e a redução de custos são imperativos.

Um dos desafios associados à sucata no forno é a variação de suas dimensões, que deve ser ajustada de acordo com o tamanho específico do forno. Em termos gerais, há uma limitação no tamanho das peças, que normalmente não excedem 1 metro de comprimento (JOHN, 2009). Fragmentos de maior dimensão podem gerar cargas excessivas, complicando o correto fechamento da abóbada do forno. O controle dessas dimensões é essencial para garantir o bom desempenho operacional, evitando sobrecargas ou problemas durante o processo de fusão, como a dificuldade no fechamento da abóbada ou o risco de danificar os componentes internos do forno, como os painéis refrigerados e eletrodos. Além disso, esses pedaços podem representar um risco significativo aos painéis refrigerados, seja pelo impacto físico direto, causado pela colisão, ou pela exposição a arcos elétricos, que podem ocorrer durante o processo de fusão, comprometendo a integridade estrutural e funcional desses painéis e impactando negativamente a eficiência do sistema de resfriamento.

Os FEA utilizam grandes quantidades de energia elétrica para aquecer o aço líquido, e a gestão eficiente dessa energia é essencial para manter a competitividade e a viabilidade

econômica das operações siderúrgicas. Sendo assim ele é controlado por meio de um painel de controle que monitora a temperatura, a corrente elétrica e outros parâmetros para assegurar que o processo de fusão ocorra de maneira segura e eficiente.

Por utilizar uma quantidade elevada de energia, um dos principais desafios enfrentados acaba sendo o resfriamento dos painéis, que são expostos a temperaturas elevadas durante o processo de fabricação. Esta exposição contínua a altas temperaturas exige um sistema de resfriamento eficaz garantindo o desempenho e a longevidade dos componentes do forno. O resfriamento insuficiente também pode causar mau funcionamento, e aumentar os custos de manutenção. Neste sentido, a revitalização dos fornos elétricos a arco emerge como uma área de pesquisa e desenvolvimento muito importante na indústria.

## 1.1 Justificativa

Esse estudo veio por meio da necessidade da realização de revitalização dos fornos elétricos a arco, com um foco específico na otimização dos processos de resfriamento, oferecendo uma oportunidade significativa de melhorar a eficiência energética e a segurança dos operadores. Além disso, este trabalho tem o potencial de contribuir para o avanço do conhecimento científico e técnico na área, integrando conceitos de automação de fornos, instrumentação, dinâmica de fluidos e gestão térmica.

O resfriamento adequado dos painéis do forno é essencial para evitar danos estruturais e funcionais, que podem comprometer a produção e aumentar os custos operacionais. Sistemas de resfriamento ineficazes podem levar ao desgaste prematuro dos componentes do forno, exigindo reparos frequentes e substituições dispendiosas. Além disso, a manutenção inadequada da temperatura pode resultar em variações indesejadas na qualidade do aço produzido, impactando negativamente a satisfação do cliente e a competitividade da empresa.

Portanto, investir em sistemas de resfriamento eficientes e modernos não é apenas uma questão de melhorar a eficiência energética, mas também de garantir a qualidade e a consistência do produto final.

## 1.2 Colocação do Problema

O problema central a ser investigado é a ineficiência dos sistemas de resfriamento dos fornos elétricos a arco, que resulta em perdas energéticas significativas, aumento dos custos de manutenção e riscos à segurança operacional. A pergunta que fundamenta este trabalho é: "Como a otimização do sistema de resfriamento dos fornos elétricos a arco pode melhorar a eficiência energética e a segurança operacional?" A hipótese principal é que a implementação de sistemas de resfriamento mais eficientes e a modernização dos componentes existentes aumentarão significativamente a eficiência e a segurança dos FEA.

Os sistemas de resfriamento atuais enfrentam vários desafios, incluindo a capacidade limitada de dissipação de calor, a falta de automação e controle precisos e a vulnerabilidade ao desgaste e falhas mecânicas. Além disso, a variabilidade nas condições operacionais, como as mudanças na carga de trabalho e as variações nas propriedades do aço líquido, exige que os sistemas de resfriamento sejam altamente adaptáveis e robustos. A falha em atender a esses requisitos pode levar a uma série de problemas, desde a degradação da qualidade do aço até interrupções não planejadas na produção, com consequências econômicas e operacionais significativas.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 *Objetivo geral*

O presente trabalho tem como objetivo central investigar a revitalização dos fornos elétricos a arco, com foco específico no processo de refrigeração, visando melhorar tanto a eficiência energética quanto a operacionalidade desses equipamentos.

### 1.3.2 *Objetivos específicos*

- Analisar os sistemas de resfriamento atuais dos fornos elétricos a arco.
- Identificar ineficiências e pontos críticos no resfriamento dos painéis do forno.
- Propor melhorias e modernizações nos sistemas de resfriamento.
- Avaliar o impacto das melhorias propostas na eficiência energética e na segurança operacional.
- Desenvolver um modelo teórico para otimização do resfriamento em fornos elétricos a arco.

## 1.4 Organização do Texto

Este trabalho é organizado da seguinte forma: inicialmente, na Introdução, é apresentado o tema, seguido da justificativa, a formulação do problema, os objetivos propostos e a estrutura do trabalho. Na Fundação Teórica, realiza-se uma revisão dos principais métodos e tecnologias disponíveis para a resolução do problema em questão, com destaque para referências relevantes de trabalhos semelhantes. A seção de Metodologia traz uma descrição detalhada dos materiais e métodos utilizados, acompanhada de uma justificativa para as escolhas metodológicas utilizadas. Em seguida, nos Resultados e Discussão, os resultados obtidos são apresentados e analisados criticamente, com o auxílio de recursos visuais como gráficos e tabelas. Nas Considerações Finais, os principais resultados do estudo são resumidos, juntamente com conclusões sobre a eficácia das melhorias e recomendações para futuras pesquisas e práticas industriais. Por fim, as Referências listam as fontes consultadas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

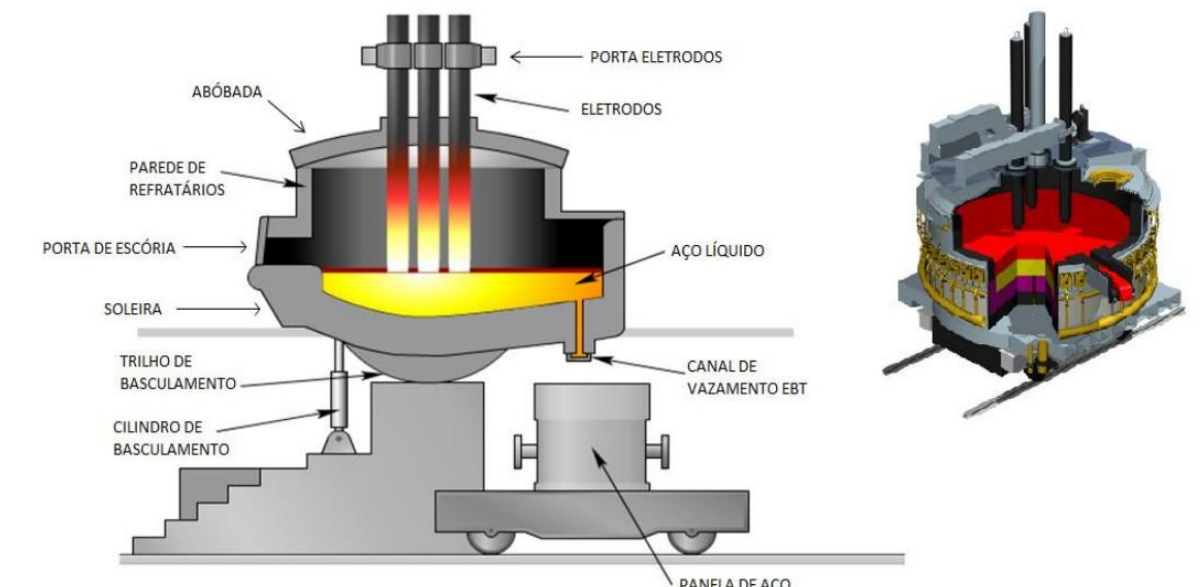
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os fornos elétricos a arco são equipamentos cruciais na produção de aço do processo de refino primário, utilizando energia elétrica para aquecer o aço líquido através de eletrodos de grafite. Esses fornos operam sob condições extremas, com temperaturas que podem alcançar de 4.500 a 6.500 °C. O funcionamento eficiente e seguro desses fornos depende de vários fatores, incluindo a qualidade dos eletrodos, a estabilidade do arco elétrico e, crucialmente, a eficácia dos sistemas de resfriamento.

O processo de refino primário no forno elétrico a arco (FEA) tem início com a fusão das matérias-primas, que consistem predominantemente em sucata de aço e/ou ferro esponja. Em algumas operações, também pode ser incluído ferro-gusa sólido na composição da carga. Após a fusão, segue-se a etapa de adição de elementos de liga, essenciais para ajustar as propriedades químicas e físicas do aço conforme as especificações desejadas (BRUCH, 2012). Essa etapa é fundamental para garantir a homogeneidade do material e a obtenção das características mecânicas apropriadas para o produto final.

Os fornos elétricos a arco compõem-se de uma carcaça, porta de escória, um canal de vazamento, abóbada, trilho e cilindro de basculamento, soleira, parede de refratários, porta eletrodos, três eletrodos de grafite com seu sistema de controle e um sistema queimadores e injetores (CHINAIDER, K, 2017).

Figura 1 – Principais componentes.



Fonte: CHINAIDER, K, 2017

Por ser um forno elétrico, o FEA tem seu ajuste da temperatura do aço líquido realizado através de um processo de fusão elétrica. Basicamente, consiste em um recipiente onde os materiais são depositados e expostos a um arco elétrico intenso, criado por eletrodos.

## 2.1 Princípios de Funcionamento dos FEA

Os fornos elétricos a arco utilizam três eletrodos de grafite para transferir energia elétrica para o aço líquido. Os eletrodos são mantidos por braços condutores de corrente conectados ao transformador por cabos e apoiados por um pórtico. Esses eletrodos são confeccionados de grafite devido à sua elevada estabilidade em altas temperaturas, mantendo sua condutividade elétrica.

A energia elétrica é transmitida ao processo por meio de três eletrodos de grafite, que são sustentados pelos braços do eletrodo condutor de corrente, conectados ao transformador através de cabos. No circuito elétrico do forno, os eletrodos desempenham um papel crucial, pois são responsáveis por transferir a potência fornecida para o aço líquido.

Em alguns casos, também são usadas com lanças de oxigênio, queimadores a gás e injetores de carbono para fornecer energia adicional através de reações químicas. Após a reação, elementos de liga podem ser adicionados para modificar composição química de forma esperada.

Se não houver uma imersão na escória, a energia é emitida do arco em direção à parede da panela e à abóbada, o que pode resultar em um desgaste prematuro. Por isso, é fundamental realizar uma adequada preparação inicial da escória e um rigoroso controle do borbulhamento de argônio ao longo de todo o processo. O eletrodo desce e entra em contato com a superfície da carga (panela de aço devidamente aterrada), semelhante a um grande curto-circuito; nesse instante, a tensão é nula e a corrente começa a aumentar.

Com a utilização da técnica de escória espumante nos fornos elétricos a arco (FEA), é viável formar uma camada de escória densa que atua como uma barreira protetora para o arco elétrico gerado pelos eletrodos de grafite. Esse procedimento não só aprimora a eficiência da transferência de energia térmica dos eletrodos para o banho metálico, como também minimiza significativamente as perdas de calor por irradiação para os painéis refrigerados, preservando, assim, a integridade dos componentes do forno e aumentando a economia energética do processo de uma dissertação (WANDEKOKEN, 2014). Além disso, essa prática contribui para a redução do desgaste dos eletrodos, otimizando a operação geral do forno.

### 2.1.1 Arco Elétrico

O arco elétrico é uma descarga elétrica entre a extremidade do eletrodo e a superfície do banho de aço (Sucata) sendo uma descarga entre um ponto na ponta do eletrodo e outro na superfície do banho. Esse arco atinge temperaturas extremamente altas, superiores a 5000°C localmente, sendo a principal fonte de calor para a fusão do aço.

Este arco elétrico é controlado por meio de corrente e tensão, utilizando um sistema de reguladores elevando a temperatura do material a níveis extremamente altos, suficientes para fundi-lo e permitir sua mistura homogênea. Essa descarga consegue chegar a temperaturas

elevadas pelo fato da polaridade dos pontos de cada eletrodo se modifica, invertendo a cada semi-ciclo da corrente conforme a frequência. Isso gera uma enorme concentração de energia criando calor que é transferido para a escória e o aço.

Em síntese, a geração do arco voltaico se assemelha ao procedimento de solda, no qual existem três elementos principais: uma fonte de energia que seria o transformador, o condutor que no caso são os eletrodos de grafite e um ponto de aterramento que seria a panela de aço que é conectada ao aterramento.

### **2.1.2 Regras de segurança**

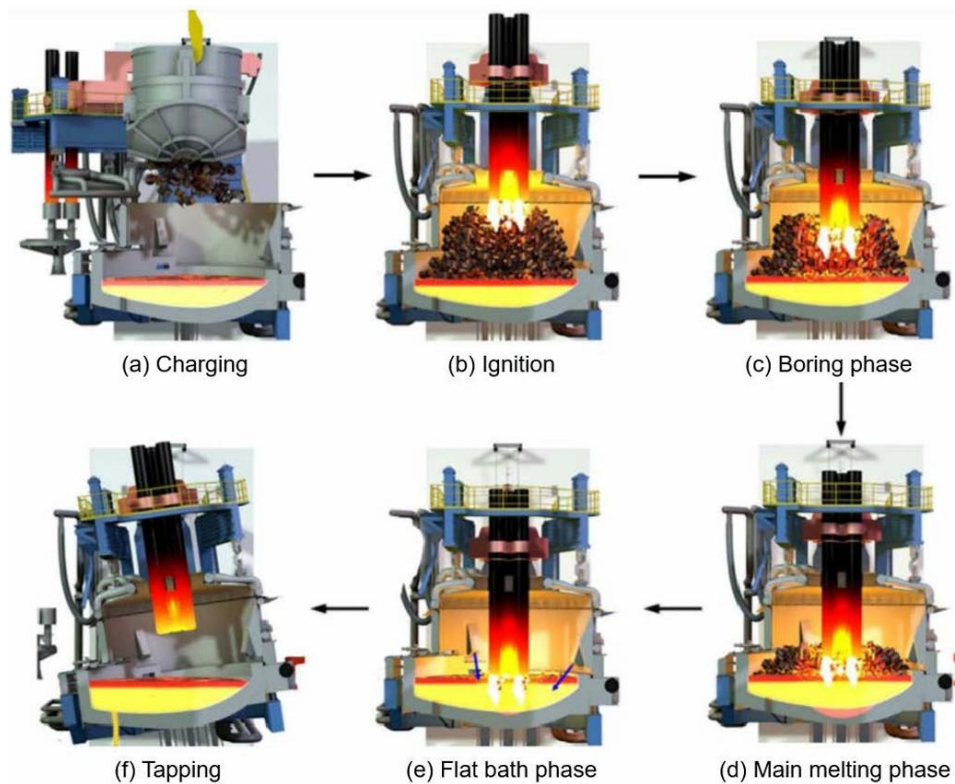
À medida que enormes quantidades de energia elétrica fluem pelo sistema, desde a subestação principal de distribuição da planta até a extremidade do eletrodo, as precauções e regulamentações de segurança elétrica assumem uma importância que transcende as meras formalidades. A complexidade e o potencial perigo envolvidos na manipulação dessas correntes demandam uma abordagem abrangente.

As regras estabelecidas são o resultado de cuidadosa elaboração, baseada em dados de engenharia e análises de experiências operacionais anteriores. Elas não apenas regem a conduta dos trabalhadores, mas também visam proteger todo o pessoal que interage com, ou está próximo, do equipamento elétrico da oficina.

## **2.2 Etapas do processo**

No processo do forno conseguimos identificar algumas etapas para o funcionamento correto do FEA (WANG, Y. 2019), Figura 2. Essas fases são controladas de forma automatizada nos fornos modernos, com sistemas que regulam potência, tensão, posição dos eletrodos e composição da carga. A eficiência energética e a redução de perdas térmicas e de materiais são objetivos-chave em todas essas etapas.

Figura 2 – Etapas do processo.



Fonte: WANG, Y. 2019.

### 2.2.1 Carregamento - Charging

O processo começa com o carregamento do forno, geralmente feito com sucata metálica, ferro-gusa, ferro-liga e outros materiais metálicos recicláveis. Esse material é inserido no forno por meio de cestos de carga (buckets), normalmente utilizando pontes rolantes. Pode ser feito em uma ou duas etapas, dependendo da capacidade do forno e do tipo de carga. Os eletrodos são elevados para permitir o carregamento e, após essa etapa, a abóbada do forno e o sistema de ventilação são reposicionados para iniciar a próxima fase.

### 2.2.2 Ignição do arco elétrico - Ignition

Após o fechamento do forno, os eletrodos de grafite descem e entram em contato com a carga metálica, iniciando a formação do arco elétrico — uma descarga elétrica de alta energia que gera calor intenso por efeito Joule. Esse calor é o responsável por elevar rapidamente a temperatura da carga. Nesta fase, ainda há pouca fusão, mas a energia elétrica começa a aquecer os metais e a formar pontos incandescentes na carga.

### **2.2.3 Fase de penetração - Boring Phase**

Na fase de boring, o arco elétrico continua atuando com alta intensidade, abrindo caminho na carga sólida até atingir camadas mais profundas. O objetivo é criar canais fundidos dentro do material metálico empilhado, permitindo que o calor penetre de forma mais eficiente. Essa fase é crucial para que o arco não fique apenas atuando superficialmente — ela prepara a carga para fundir de maneira uniforme.

### **2.2.4 Fase principal de fusão - Main Melting Phase**

Aqui temos o pico de consumo de energia elétrica. A maior parte da carga metálica já foi aquecida, e o processo de fusão plena está em andamento. A corrente elétrica é mantida em valores elevados para derreter a maior quantidade de metal no menor tempo possível. A formação da escória também é intensificada — ela cobre o banho metálico, auxiliando no isolamento térmico e na captura de impurezas, como enxofre e fósforo.

### **2.2.5 Fase de Banho - Flat Bath Phase**

Com a carga totalmente fundida, o forno atinge a fase de banho plano, quando o aço líquido se estabiliza no fundo do forno. Nessa condição, a transferência de energia torna-se mais eficiente, pois o arco elétrico atua diretamente sobre uma superfície metálica líquida e contínua. Aqui, são realizados os ajustes finais da temperatura e da composição química, adicionando ligas metálicas ou agentes desoxidantes, conforme necessário. Também é a fase de agitação eletromagnética, se aplicável, garantindo homogeneidade. A utilidade do calor gerado dependerá fortemente da transferência efetiva de calor para a sucata de aço e o banho. Ensaios demonstraram que o aumento da carga térmica nos painéis do forno resfriado a água foi de 6 a 7 kWh/tonelada (PRETORIUS, E; OLTMANN, H.).

### **2.2.6 Vazamento - Tapping**

Por fim, com o aço na composição e temperatura ideais, inicia-se a fase de tapping, ou seja, a transferência do aço líquido para a panela (ladle). Isso é feito por meio de um orifício na parte inferior do forno (tapping hole), que é aberto para escoar o aço por gravidade. Em paralelo, a escória restante é retirada pela escória primária para ser tratada ou descartada. Após o tapping, o forno pode iniciar uma nova corrida, voltando à fase de carregamento.

## **2.3 Sistemas de Resfriamento**

Os sistemas de resfriamento são essenciais para manter a integridade estrutural e funcional dos fornos elétricos a arco. Os painéis do forno estão expostos a temperaturas extremamente altas, e o resfriamento insuficiente pode levar a danos significativos, aumentando os custos de

manutenção e comprometendo a segurança dos operadores. Além disso, a manutenção inadequada da temperatura pode resultar em variações indesejadas na qualidade do aço produzido, impactando negativamente a competitividade da empresa.

Existem várias tecnologias disponíveis para o resfriamento dos painéis dos fornos elétricos a arco, incluindo sistemas de resfriamento por água, resfriamento por ar forçado e resfriamento combinado. Cada uma dessas tecnologias apresenta vantagens e desvantagens específicas, e a escolha do sistema mais adequado depende das características operacionais do forno e das condições ambientais.

### **2.3.1 Resfriamento a Cerâmica Refratária**

Esta técnica se baseia na aplicação de materiais cerâmicos de alta resistência térmica e mecânica nas áreas mais críticas do forno, onde ocorrem os maiores desgastes devido ao calor intenso e à ação do arco elétrico. Pelo fato do FEA operar em temperaturas extremamente altas, que frequentemente excedem 1000°C, os revestimentos cerâmicos refratários desempenham um papel vital na proteção das estruturas, porém se mostra um pouco ineficiente atualmente pelo fato de se ter um limite de temperatura suportada até o rompimento, mesmo que ainda muito utilizada atualmente.

### **2.3.2 Resfriamento por Água**

É uma das técnicas mais eficazes, para manter a continuidade e a eficiência operacional devido à alta capacidade de absorção de calor da água. Sistemas de resfriamento por água geralmente envolvem a circulação contínua de água através de tubos ou serpentinas localizadas nos painéis do forno. Este método é eficiente, mas requer um controle rigoroso para evitar problemas como corrosão e incrustação.

Os tubos de refrigeração operam através de um sistema de circulação de água dentro de painéis especialmente projetados. Esses painéis são estrategicamente instalados nas paredes laterais do forno, substituindo os revestimentos refratários tradicionais para melhorar a eficiência de resfriamento.

O passo a passo dessa técnica é a entrada de água fria, circulação pelos painéis, absorção de calor, saída de água quente e resfriamento externo, respectivamente. A água de resfriamento entra no sistema através de uma rede de tubos conectados aos painéis refrigerados. Esta água é geralmente mantida a uma temperatura controlada para maximizar a eficiência da troca de calor. Uma vez dentro do painel, a água flui ao longo dos tubos que percorrem toda a extensão do painel. Durante esse percurso, a água absorve o calor gerado pelo arco elétrico e pelo processo de fusão.

À medida que a água circula pelos tubos, ela absorve a energia térmica do forno, o que ajuda a manter a temperatura das paredes do forno dentro de limites seguros. Isso evita danos aos materiais estruturais e reduz a necessidade de paradas frequentes para manutenção. Após

percorrer o comprimento do painel e absorver o calor, a água aquecida é direcionada para fora do sistema de resfriamento e levada para um sistema de resfriamento externo, onde sua temperatura é reduzida antes de ser retomada ao sistema. Esse ciclo contínuo de entrada e saída de água garante que os painéis refrigerados possam dissipar de maneira eficaz o calor gerado no interior do forno.

Os painéis refrigerados são diferenciados por meio da orientação dos tubos e da quantidade de fileiras de tubos em cada painel se dividindo em:

- Painéis de Tubos Horizontais;
- Painéis de Tubos Verticais;
- Painéis de Tubos Mistos.

Além disso, os painéis são classificados de acordo com a configuração de seus tubos e a quantidade de fileiras utilizadas, o que influencia diretamente sua capacidade de resfriamento e manutenção.

Os painéis simples são caracterizados por possuir uma única fileira de tubos, o que fornece uma solução de resfriamento mais básica e direta. Esta configuração é adequada para aplicações onde a carga térmica não é extremamente alta e onde o espaço e os recursos são limitados.

Em contraste, os painéis duplos apresentam uma construção mais robusta, consistindo em duas fileiras de tubos. Estes painéis são projetados como duas unidades independentes, mas fixadas em uma estrutura comum, proporcionando um aumento significativo na eficiência de resfriamento (WANDEKOKEN, 2015). O painel que fica voltado para o interior do forno é denominado "Painel Frontal" ou "Painel Interno", enquanto o painel que está posicionado mais próximo da carcaça externa do forno é conhecido como "Painel Traseiro" ou "Painel Externo". Esta configuração não apenas melhora a capacidade de absorção e dissipação de calor, mas também facilita o acesso para manutenção e troca, uma vez que a disposição dos painéis permite um manejo mais eficiente das partes que necessitam de intervenção.

### **2.3.3 Resfriamento por Ar Forçado**

Utiliza ventiladores para forçar a circulação de ar ao redor dos painéis do forno. Este método é menos eficiente que o resfriamento por água, mas é mais simples de implementar e manter. É particularmente útil em ambientes onde o uso de água é limitado ou indesejável. A manutenção do sistema de ventilação é geralmente menos complexa e mais barato que a manutenção dos sistemas por água. Sem contar que esse método é ideal para locais onde a utilização de água é difícil ou nula, como em regiões com escassez de água ou onde há restrições ambientais. O resfriamento por ar forçado é menos eficiente na dissipação de calor comparado

com o feito por água, o que pode limitar sua aplicabilidade em fornos que operam em temperaturas muito altas.

Porém essa técnica pode ser usada juntamente com o processo de água, mais conhecido como resfriamento combinado. Ele junta os elementos de resfriamento por água e por ar para maximizar a eficiência e a segurança. Este método pode oferecer um equilíbrio ideal entre capacidade de resfriamento e facilidade de manutenção.

## 2.4 Regulamentações

Os códigos elétricos nacionais e locais, rigidamente estabelecidos, permeiam todas as fases do projeto e instalação na oficina. No entanto, compreende-se que a mera adesão a precauções, regulamentos e códigos elétricos rigorosos não pode, por si só, garantir a prevenção de acidentes.

Por exemplo, regras estritas controlam o processo de energização e desenergização dos circuitos que alimentam o forno. Uma diretriz fundamental requer que os operadores do forno bloqueiem a fonte de alimentação e removam a chave ao subirem no forno ou trabalharem em sua proximidade. É imperativo que ninguém esteja dentro do forno ou próximo ao sistema condutor de alta corrente enquanto o transformador estiver energizado.

Além disso, outras regras abrangem procedimentos diários, como adições de eletrodos, técnicas de aterramento e manutenção. Por exemplo, durante qualquer manutenção em componentes elétricos, é prática comum intertravar todos os dispositivos de desconexão de energia e aterrar todos os condutores, incluindo o transformador. A energia auxiliar que alimenta o sistema de regulação do forno também não deve ser negligenciada.

A segurança do pessoal também se estende à abóbada do transformador, onde a soldagem elétrica nos braços dos eletrodos ou em tubos de barramento pode induzir tensões perigosas. Portanto, durante a realização de trabalhos de manutenção nessa área, todas as fases de trabalho devem ser adequadamente aterradas. Em todos os outros momentos, a abóbada do transformador deve permanecer trancada, garantindo a segurança de todos os envolvidos.

## 2.5 Revisão de Trabalhos Anteriores

Vários estudos têm investigado a otimização dos sistemas de resfriamento dos fornos FEA. Pesquisas anteriores mostraram que a modernização dos componentes de resfriamento pode reduzir significativamente as perdas energéticas e aumentar a segurança operacional. Por exemplo, a utilização de materiais de alta condutividade térmica nos painéis do forno pode melhorar a dissipação de calor, enquanto a implementação de sistemas de automação e monitoramento contínuo pode ajudar a identificar e corrigir problemas de resfriamento em tempo real.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Materiais e Métodos

O estudo utiliza uma abordagem teórica e experimental para analisar e melhorar os sistemas de resfriamento dos fornos elétricos a arco. Os principais materiais utilizados incluem componentes de resfriamento de alta eficiência, sensores de temperatura, sistemas de automação e ferramentas de simulação computacional. Os métodos incluem a análise térmica dos painéis do forno, a simulação do fluxo de calor e a implementação de protótipos de sistemas de resfriamento modernizados.

A análise térmica dos painéis é uma etapa fundamental para garantir a eficiência e a durabilidade dos componentes do forno. Este processo envolve o monitoramento contínuo da temperatura dos painéis durante a operação do forno, utilizando sensores de alta precisão posicionados estrategicamente. Esses sensores fornecem dados detalhados sobre o comportamento térmico, permitindo a identificação de áreas suscetíveis ao superaquecimento. Com essas informações, é possível realizar ajustes para mitigar o risco de desgaste prematuro dos materiais e melhorar a eficiência dos sistemas de resfriamento. O sensor escolhido para utilização é um transmissor de temperatura TA2105 da empresa IFM.

Figura 3 – Transmissor de temperatura IFM TA2105.



Fonte: TA2105, IFM.

Os principais motivos da escolha desse transmissor é pela precisão elevada em toda a faixa de medição de temperatura é uma característica crucial para a operação eficiente e segura de sistemas industriais, especialmente em processos que envolvem altas temperaturas, como os encontrados no FEA (TA2105, IFM). Os sensores modernos são projetados para fornecer medi-

ções de temperatura com uma exatidão notável em toda a gama de operação, desde temperaturas relativamente baixas até os níveis extremos encontrados durante a fusão de metais. Essa precisão é vital para o controle rigoroso dos processos de aquecimento e resfriamento, garantindo que os parâmetros operacionais estejam sempre dentro das especificações desejadas e que quaisquer variações possam ser detectadas e corrigidas rapidamente.

Além da precisão, a dinâmica de resposta dos sensores é uma característica essencial que define a capacidade do sistema de reagir rapidamente às mudanças de temperatura. Sensores com uma resposta dinâmica particularmente boa e um tempo de atraso de disponibilidade extremamente curto são capazes de fornecer dados quase em tempo real. Isso é crucial em ambientes industriais onde as condições podem mudar rapidamente e onde a capacidade de ajustar os processos com agilidade pode prevenir falhas e otimizar o desempenho. O tempo de resposta rápido permite uma regulação mais precisa e eficiente dos processos, contribuindo para a estabilidade e segurança operacionais.

Os sensores de temperatura modernos, de acordo com o catálogo do instrumento, também são projetados com um invólucro robusto de aço inoxidável, oferecendo uma resistência excepcional à pressão e às condições adversas encontradas em ambientes industriais severos. A proteção aprimorada dos sensores é projetada para atender aos requisitos rigorosos de ambientes industriais duros, onde os fatores como temperaturas extremas, umidade, vibrações e contaminantes podem comprometer o desempenho dos equipamentos. Os sensores são frequentemente equipados com classificações de proteção que garantem seu funcionamento seguro e confiável, independentemente das condições externas. Este grau de proteção é crucial para garantir que os sensores continuem operando de forma eficaz e fornecendo dados precisos mesmo em condições adversas.

Para uma integração mais eficiente com sistemas industriais modernos, os sensores de temperatura oferecem uma saída analógica precisa, que proporciona dados de temperatura em formatos compatíveis com os sistemas de controle e monitoramento existentes. A comunicação via IO-Link é uma característica adicional que facilita a integração e a comunicação entre os sensores e os sistemas de automação. IO-Link é uma tecnologia de comunicação que permite uma conexão digital bidirecional entre os sensores e os sistemas de controle, oferecendo uma interface de comunicação confortável e altamente eficiente (AL1303, IFM). Para realização da comunicação do sensor de temperatura foi escolhido o módulo IO-Link master AL1303 da IFM.

Figura 4 – IO-Link Master IFM AL1303.



Fonte: AL1303, IFM.

Esta tecnologia não só simplifica a configuração e a manutenção dos sensores, mas também permite a coleta de dados mais detalhados e o diagnóstico de condições operacionais, melhorando a gestão e o controle dos processos industriais. Essas características combinadas garantem que os sensores de temperatura não apenas atendam, mas superem os requisitos operacionais exigidos por ambientes industriais complexos, proporcionando uma medição precisa e confiável, essencial para a otimização dos processos e a manutenção da segurança e eficiência dos sistemas.

A análise térmica também é essencial para avaliar a eficácia dos sistemas existentes, assegurando que as temperaturas críticas sejam mantidas dentro dos limites seguros e que as condições operacionais estejam otimizadas para maximizar a eficiência do processo de fusão e a qualidade do aço produzido.

Simultaneamente, a simulação computacional, utilizando softwares de dinâmica de fluidos computacional (CFD), desempenha um papel crucial na modelagem e otimização dos sistemas de resfriamento dos painéis. Através dessa simulação, é possível modelar detalhadamente o fluxo de calor e o comportamento térmico dentro do forno, testando diferentes configurações e parâmetros de resfriamento para prever seu impacto no desempenho geral. A simulação CFD oferece uma visão aprofundada dos padrões de fluxo de calor e das áreas críticas que necessitam de intervenção, permitindo ajustes precisos no design dos sistemas de resfriamento. Esse método ajuda a maximizar a eficiência do controle térmico e a gestão energética do forno, resultando em um processo de fusão mais eficiente e sustentável.

Além disso, a comparação de protótipos é uma etapa prática essencial para validar as

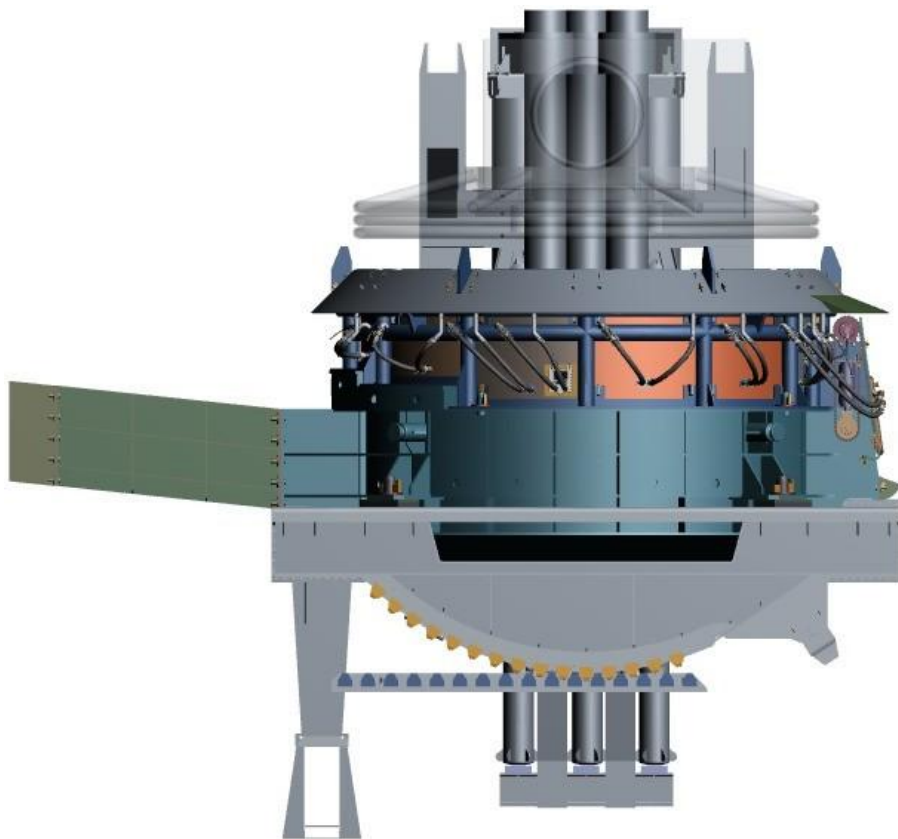
soluções de resfriamento em condições operacionais reais. Consiste na busca de comparação e teste de protótipos dos sistemas de resfriamento, permitindo a avaliação da capacidade de resfriamento, eficiência energética e impacto na qualidade do aço produzido. Durante essa fase, os projetos são submetidos a dados de condições reais de operação do forno elétrico a arco para verificar seu desempenho. A análise dos resultados obtidos permite a identificação de melhorias e ajustes necessários, garantindo que as soluções propostas funcionem de maneira eficiente e confiável. A validação prática é crucial para assegurar que as soluções não apenas atendam às expectativas teóricas, mas também contribuam para a melhoria contínua dos processos de fusão e a maximização da qualidade do produto final.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico será subdividido em seções que abordarão detalhadamente os aspectos cruciais relacionados à segurança de operação relacionado a aterramento, metodologia de resfriamento por água, com foco nas consequências técnicas desse método. Também serão discutidos o dimensionamento necessário das placas de resfriamento para garantir a integridade estrutural do forno, o desenvolvimento de projetos de instrumentação específicos, e os sistemas de comunicação utilizados para monitoramento e controle do processo.

Para viabilizar a análise e a simulação dos aspectos termomecânicos e funcionais do sistema de resfriamento, foi desenvolvido um modelo tridimensional representativo do Forno Elétrico a Arco (FEA), conforme ilustrado na Figura 5. A modelagem foi elaborada utilizando as ferramentas de desenho técnico AutoCAD e SolidWorks, possibilitando uma representação precisa da geometria do forno e a integração dos painéis refrigerados a água.

Figura 5 – Modelo 3D do FEA.



Fonte: Autoria própria.

Neste modelo, foram inseridas as placas de resfriamento previamente selecionadas, posicionadas de forma estratégica com o objetivo de mapear os potenciais pontos de aterramento elétrico, estabelecer a proporção dimensional entre os elementos estruturais e definir a quantidade e o posicionamento ideal de sensores térmicos e de vazão. A modelagem também permitiu

visualizar as rotas de circulação do fluido refrigerante, possibilitando avaliar o desempenho térmico esperado do sistema.

#### 4.1 Aterramento

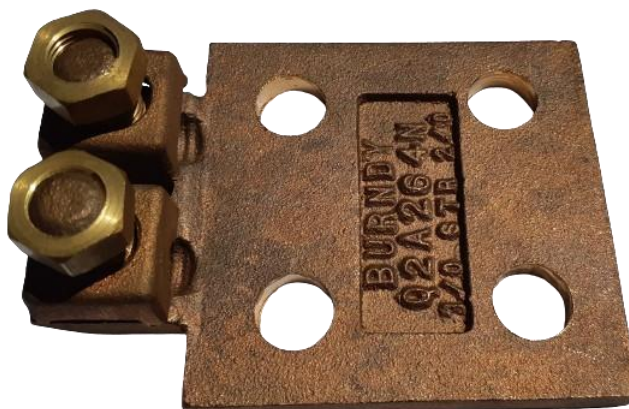
O sistema de aterramento de um forno elétrico a arco representa não apenas uma exigência normativa, mas um elemento estruturante para a proteção eletroeletrônica e a segurança dos operadores. Durante a revitalização dos FEA, observou-se que muitos sistemas apresentavam falhas na continuidade elétrica entre os componentes metálicos do forno, o que representa um risco grave de choques elétricos e danos aos equipamentos de controle.

O aterramento eficiente garante o escoamento seguro das correntes de fuga, estabiliza os potenciais elétricos da estrutura e minimiza os efeitos de interferência eletromagnética (EMI) gerados pelas correntes de arco. Um ponto muitas vezes ignorado na prática industrial é o aterramento das placas de refrigeração, que, por estarem diretamente em contato com o forno e com os circuitos de água condutiva, devem estar eletricamente conectadas ao sistema de equipotencialização da planta. A ausência dessa conexão pode criar diferenças de potencial perigosas entre a estrutura metálica e os pontos aterrados, comprometendo a segurança da operação.

No estudo, foram utilizados condutores da marca Burndy de cobre Q2A26-4 com bitola mínima de 50 mm<sup>2</sup>, conectados com terminais prensados e soldados, fixados em barramentos equipotenciais devidamente isolados e inspecionáveis, conforme recomendações da norma ABNT NBR 5410 e as exigências da NR-10 (Q2A26-4N, TEMELEC).

A Figura 6 é uma figura retirada de um site para representar o equipamento utilizado para fazera ligação elétrica de uma parte a outrado FEA.

Figura 6 – Terminal para cabos à barra.



Fonte: Q2A26-4N, Temelec.

Adicionalmente, foi utilizada cordoalha de cobre estanhada como elemento condutor flexível no barramento de equipotencialização, conectada diretamente aos terminais das placas de refrigeração por meio de terminais de compressão em cobre eletrolítico. A escolha da cordoalha se justifica por sua alta condutividade elétrica associada à flexibilidade mecânica, característica essencial em ambientes sujeitos a vibrações térmicas e mecânicas, como ocorre nos FEA durante ciclos de operação e desligamento. Essa flexibilidade reduz tensões nos pontos de conexão e minimiza o risco de ruptura ou afrouxamento dos condutores, contribuindo para a continuidade elétrica eficiente entre os diversos componentes metálicos do forno.

A Figura 7 é uma figura ilustrativa para representar a cordoalha prevista (ALIBABA, 2023).

Figura 7 – Terminal para cabos à barra.



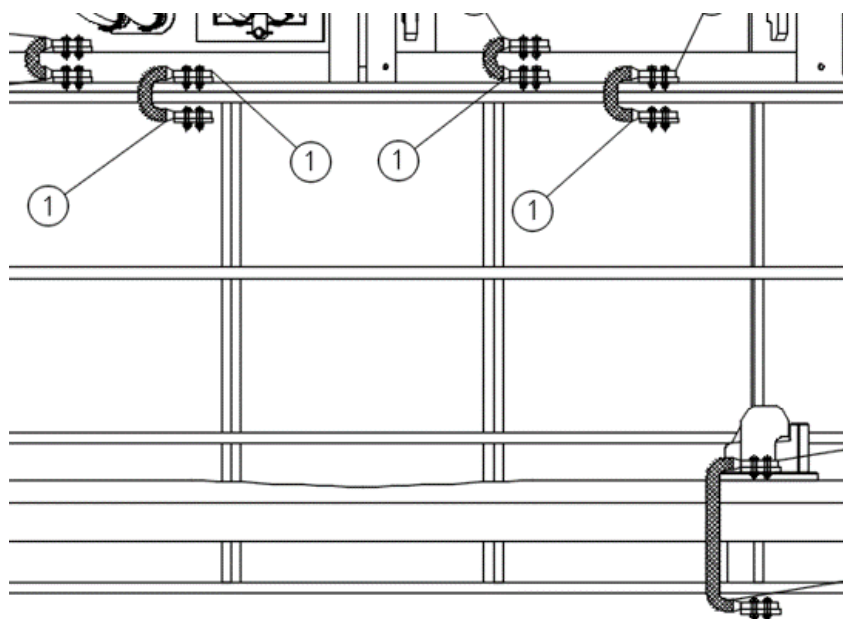
Fonte: Alibaba, 2023.

Além disso, foram avaliadas tecnologias complementares, como o uso de malhas de aterramento subterrâneas interligadas à estrutura metálica e aos painéis de comando, promovendo redundância na proteção elétrica.

Para garantir a eficiência e a padronização do sistema de aterramento, foi desenvolvido um projeto técnico detalhado no software AutoCAD, contemplando a distribuição das cordoalhas de cobre estanhadas e sua interligação aos terminais condutores de cada componente estrutural do forno. O desenho abrange a carcaça metálica externa, braços porta-eletrodos, estruturas de sustentação, além das placas de refrigeração, assegurando uma malha equipotencial robusta em toda a extensão do forno.

A Figura 8 é um recorte do projeto técnico elaborado.

Figura 8 – Simbologia de ligação.

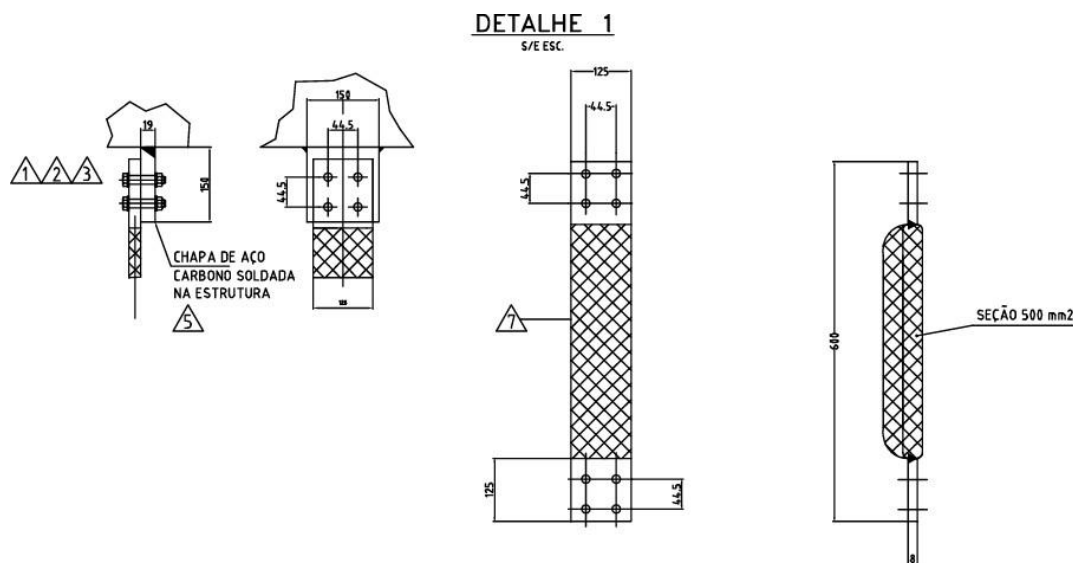


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 8, é possível identificar as cordoalhas, sendo destacado o Detalhe Típico 1, o qual está especificado no projeto de aterramento com o objetivo de esclarecer a forma correta de posicionamento e soldagem das cordoalhas na estrutura do forno. Esse detalhe apresenta as dimensões em milímetros, garantindo padronização e precisão na execução.

A representação do Detalhe Típico 1 também facilita a interpretação por parte das equipes de montagem, assegurando a conformidade com os critérios estabelecidos em projeto e reduzindo o risco de falhas de conexão elétrica. Além disso, essa documentação técnica contribui para uma manutenção mais eficiente, pois define pontos de referência claros para inspeção e reaperto das conexões ao longo do tempo. A Figura 9 apresenta visualmente esse detalhe conforme definido no projeto.

Figura 9 – Detalhe típico 1.

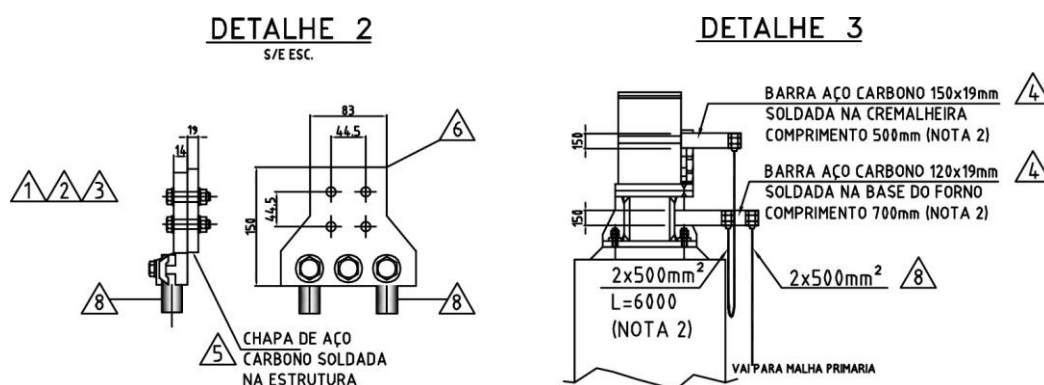


Fonte: Autoria própria.

Além do Detalhe Típico 1, foram projetados mais dois detalhes construtivos, Figura 10, com o objetivo de representar, de forma clara e padronizada, as configurações específicas de ligação e soldagem das cordoalhas ao forno. O Detalhe Típico 2 apresenta a utilização de um conector do tipo cabo-barras, confeccionado em bronze de alta resistência mecânica, com acabamento estanhado para garantir proteção contra oxidação e melhora na condutividade elétrica. Esse conector é projetado para permitir a conexão de até três condutores com seção transversal de 500 mm<sup>2</sup> a barramentos ou estruturas metálicas do forno. O componente é fornecido com porcas sextavadas de bronze, sendo utilizado o modelo comercial Q3A44-4N-W, fabricado pela Burndy.

Já o Detalhe Típico 3 descreve uma configuração de conexão por meio de um barramento metálico, fabricado em aço carbono, instalado nas regiões estratégicas da estrutura do forno. O barramento consiste em uma placa de espessura 19 mm, com dimensões de 700 mm x 150 mm, dotada de quatro furos roscados M14 conforme o padrão NEMA 4, permitindo a fixação segura das cordoalhas e facilitando futuras manutenções. Essa solução proporciona robustez mecânica e versatilidade de conexão, especialmente em áreas onde o acesso direto à estrutura do forno é limitado ou onde se requer concentração de pontos de aterramento.

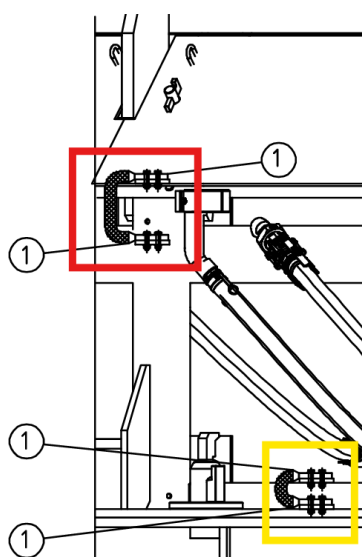
Figura 10 – Detalhe típico 2 e 3.



Fonte: Autoria própria.

De forma geral, o sistema de ligação elétrica do Forno Elétrico a Arco (FEA) é projetado de modo a garantir a equipotencialidade de toda a estrutura, assegurando o correto escoamento das correntes de fuga e a proteção dos componentes metálicos frente a riscos elétricos. Esse circuito de aterramento tem início na região da abóbada do forno, onde há a conexão direta com a estrutura da tubulação que conduz o fluido refrigerante, especificado pela cor vermelha na Figura 11. A partir desse ponto, estabelece-se uma ligação com os painéis de refrigeração, os quais são interligados eletricamente à carcaça superior do forno, especificado pela cor amarela.

Figura 11 – Simbologia de ligação.

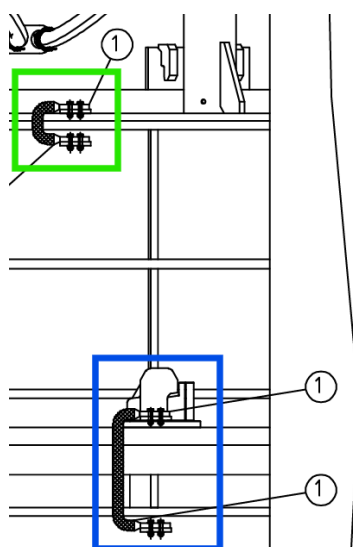


Fonte: Autoria própria.

A continuidade elétrica segue da carcaça superior até a carcaça inferior, indicada pela cor verde na Figura 12. Em sequência, o aterramento se estende da carcaça inferior até a plataforma

do forno, representado pela cor azul na Figura 12.

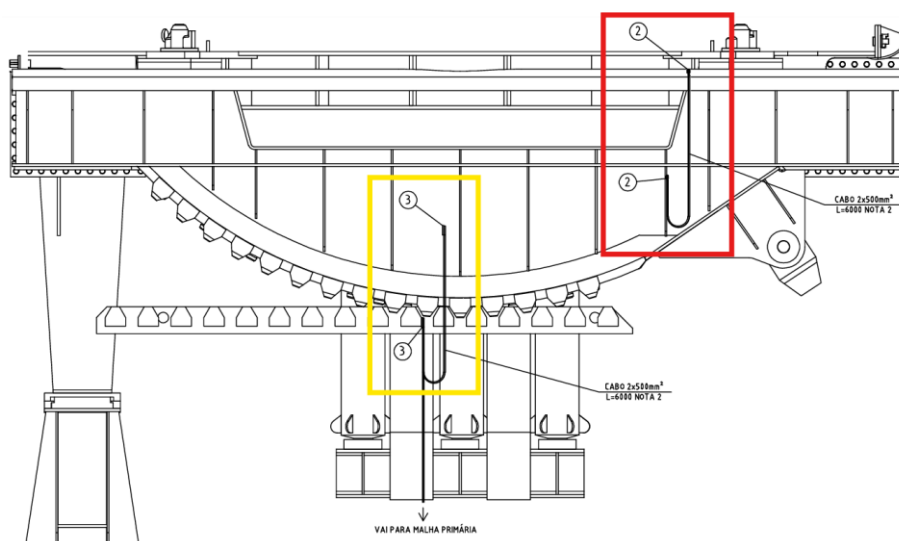
Figura 12 – Simbologia de ligação.



Fonte: Autoria própria.

A próxima ligação seria da plataforma do forno até o trilho móvel responsável pelo basculamento do conjunto, indicado pela cor vermelha da Figura 13 que é projetado comm o detalhe típico 2. O trilho móvel, por sua vez, é interligado com o padrão do detalhe típico 3 ao trilho fixo de basculamento, estabelecendo uma ponte elétrica que dá continuidade ao caminho da corrente até alcançar a malha primária de aterramento da planta, indicado pela cor amarela na Figura 13.

Figura 13 – Simbologia de ligação.



Fonte: Autoria própria.

Paralelamente a esse trajeto, o sistema de condução de corrente contempla o porta-eletrodos, que possui ligação elétrica direta com a plataforma do forno, seguindo posteriormente para a mesma malha primária. Essa configuração assegura que todas as partes metálicas do forno estejam eletricamente conectadas, criando uma condição de curto-circuito intencional e controlado, o que é essencial para a segurança operacional e a integridade dos equipamentos.

Um ponto de atenção importante no projeto é o dimensionamento das cordoalhas utilizadas nas partes móveis do forno, especialmente nas regiões de articulação e movimentação, como no mecanismo de basculamento. Nessas áreas, é recomendado que as cordoalhas tenham comprimento excedente em relação ao trajeto estático, permitindo flexibilidade suficiente para acompanhar os movimentos mecânicos sem gerar esforços de tração excessivos. Esse cuidado visa evitar rompimentos ou desconexões acidentais durante o direcionamento do forno ao canal de vazamento do aço líquido, preservando a continuidade elétrica e a segurança do sistema como um todo.

## 4.2 Refrigeração por água

O impacto da escolha do sistema de refrigeração à água se reflete diretamente na durabilidade do forno e na estabilidade do processo de fusão. A eficiência na dissipação de calor, a resistência ao desgaste térmico e a facilidade de manutenção são aspectos que devem ser cuidadosamente considerados.

Para a determinação das perdas térmicas associadas às paredes refratárias, à escória e ao tempo de transporte da panela entre as estações do forno elétrico a arco (FEA) e da usina de fundição (FP), é realizado o cálculo do Efeito Térmico Parcial II, utilizando o método de diferenças finitas. Este método permite uma análise detalhada e precisa das variações de temperatura, considerando as interações térmicas complexas entre os componentes do forno e o impacto das condições operacionais no desempenho térmico geral (STRAGLIOTTO, 2017).

Do ponto de vista construtivo, é fundamental garantir que todos os componentes refrigerados sejam devidamente integrados ao projeto elétrico e mecânico do forno, respeitando as normas técnicas vigentes, como a NR-13 (Caldeiras e Vasos de Pressão) e a NR-10 (Segurança em Instalações Elétricas), no que tange ao isolamento, contenção e inspeção periódica do sistema. A aplicação de materiais resistentes à corrosão, como tubos de cobre estanhado ou aço inoxidável AISI 316L, garante maior durabilidade ao sistema e reduz custos com manutenção corretiva.

### 4.2.1 *Análise dos Sistemas de Resfriamento Atuais*

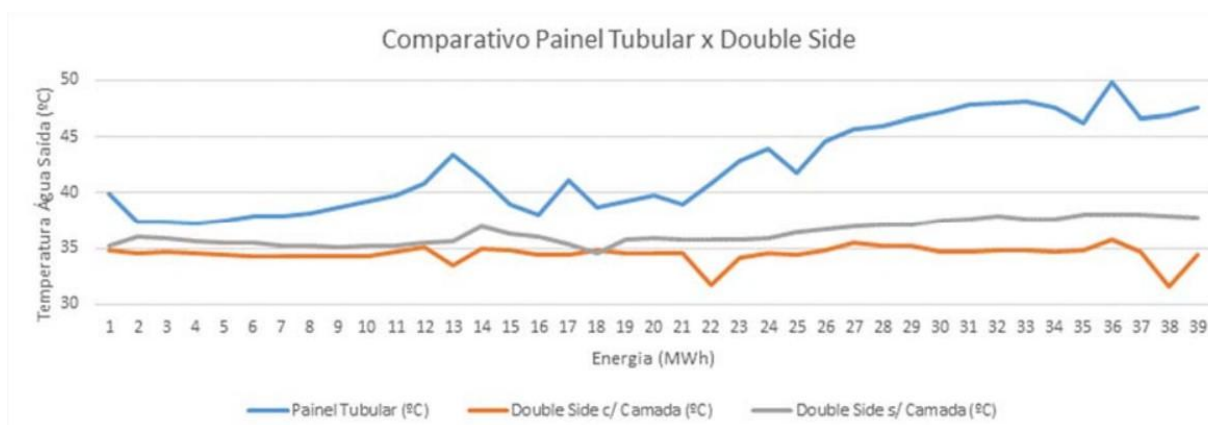
A análise térmica dos painéis do forno revelou áreas de superaquecimento, indicando ineficiências nos sistemas de resfriamento atuais. As simulações computacionais confirmaram que essas áreas são propensas a danos estruturais e desgaste acelerado, reforçando a necessidade de melhorias nos sistemas de resfriamento. Com o passar dos anos, o método de refrigeração

utilizando cerâmica e argila demonstrou ser menos eficiente comparado ao sistema de refrigeração a água, principalmente devido à necessidade constante de manutenção e aos custos associados. Esse método cerâmico, embora inicialmente adotado, revelou-se menos vantajoso em termos de durabilidade e eficiência térmica.

Em contraste, durante a 46ª edição do Seminário de Aciaria da ABM Week, foi realizada uma análise comparativa detalhada entre diferentes técnicas de resfriamento. O estudo abordou três métodos distintos: o de Painel Tubular de água, o Double Side com camada cerâmica e o Double Side sem camada cerâmica.

A comparação, figura 14, visou avaliar a eficácia de cada sistema com base na temperatura de saída da água de refrigeração dos circuitos dos painéis.

Figura 14 – Comparação de métodos.



Fonte: Wandekoken, 2015

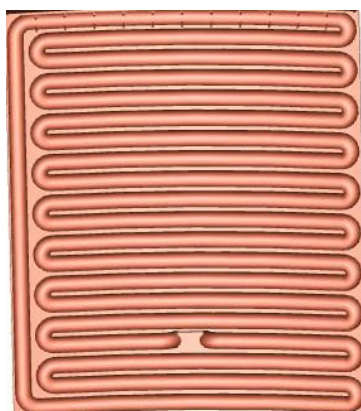
Os testes revelaram que a temperatura da água de refrigeração no circuito frontal dos painéis, que é mais exposto às condições adversas do forno FEA, sofreu variações significativas. O gráfico gerado a partir dos dados mostra que o painel tubular convencional apresentava uma elevação da temperatura da água ao final da fusão da primeira carga e, subsequentemente, durante a fusão do segundo carregamento até o término do processo de refino.

Em termos de eficiência, o painel Double Side sem camada cerâmica demonstrou uma extração de calor de aproximadamente 90 kJ/s, enquanto o painel tubular convencional alcançou uma extração em torno de 380 kJ/s. Estes resultados indicam que, embora o painel Double Side ofereça algumas vantagens, o painel tubular ainda é superior em termos de capacidade de remoção de calor, refletindo sua maior eficácia no controle térmico dentro do forno elétrico a arco (WANDEKOKEN, 2015).

### 4.2.2 Proposta de Melhoria

A proposta de melhoria apresentada visa modernizar o sistema de refrigeração do forno elétrico a arco (FEA), substituindo componentes de resfriamento obsoletos, anteriormente fabricados em cerâmica, por painéis metálicos com tubulação interna para circulação de água (figura 15). Essa substituição não se trata apenas de uma troca de materiais, mas sim de uma atualização tecnológica alinhada às melhores práticas industriais voltadas à eficiência térmica e segurança operacional desejada pela empresa contratante.

Figura 15 – Painel tubular de refrigeração.

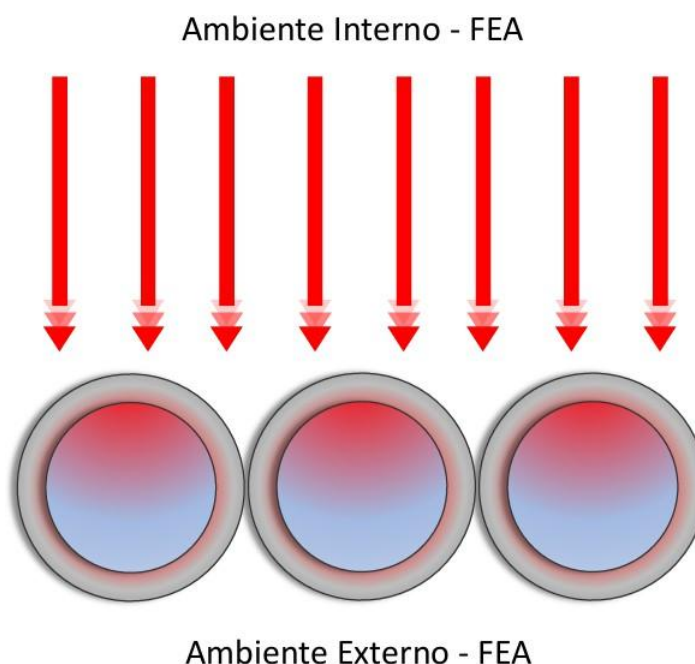


Fonte: Autoria própria.

A cerâmica, embora apresente resistência térmica razoável, possui baixa condutividade térmica quando comparada a metais como o cobre ou o aço inoxidável. Isso limita sua eficiência na transferência de calor, comprometendo a dissipação rápida do calor gerado na zona do arco elétrico e nas áreas adjacentes. A adoção de painéis tubulares metálicos com circulação de água possibilita uma convecção forçada contínua, maximizando a remoção de calor por unidade de tempo e protegendo as estruturas críticas contra sobreaquecimento, deformações e danos estruturais.

Na figura 16, observa-se a disposição da tubulação pertencente ao sistema de painéis refrigerados a água, os quais são componentes fundamentais para a proteção térmica da carcaça e demais estruturas metálicas do FEA. Na região interna do forno, a tubulação é exposta diretamente ao ambiente de alta temperatura gerado pelo arco elétrico e pela radiação térmica do banho metálico, promovendo intensa absorção de calor (WANDEKOKEN, 2015). Nessa configuração, o fluido refrigerante (água) circula continuamente no interior dos tubos, realizando a troca de calor por condução e convecção, retirando energia térmica da superfície interna exposta.

Figura 16 – Troca de calor no painel tubular.



Fonte: Wandekoken, 2023

À medida que o fluido percorre o circuito e se afasta do interior do forno, nota-se, do lado externo, uma redução significativa no gradiente térmico ao longo da tubulação. Isso ocorre devido à dissipação do calor absorvido, tanto pela ação do sistema de circulação forçada quanto pela interação com o meio externo, o que permite manter a integridade estrutural do painel e contribui para o controle da temperatura nas regiões periféricas do equipamento. Essa diferença de energia térmica entre os lados interno e externo da tubulação evidencia a eficiência do sistema de resfriamento e reforça a importância do seu dimensionamento adequado para garantir a operação segura e contínua do FEA.

Além disso, os novos sistemas foram integrados com sensores de temperatura, vazão e pressão, permitindo um monitoramento contínuo das condições de operação. Essa automação contribui diretamente para a antecipação de falhas, o controle mais preciso da temperatura nas zonas críticas e a redução de intervenções manuais, o que melhora a segurança dos operadores e minimiza paradas não programadas.

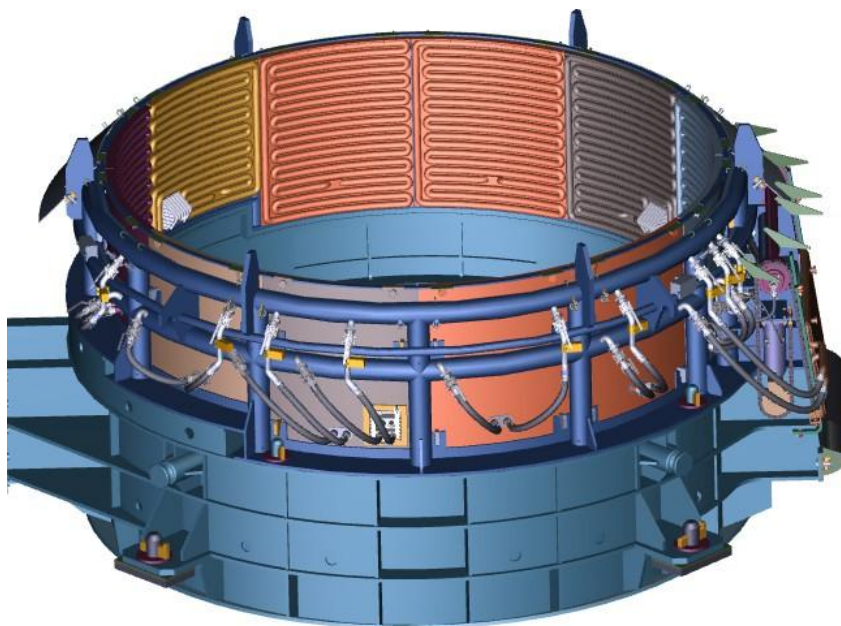
Como benefício adicional, a maior uniformidade térmica resultante da melhoria no sistema de refrigeração também pode levar a uma diminuição nas variações dimensionais das peças produzidas, o que fortalece os índices de repetibilidade e confiabilidade do processo. Em um contexto de siderurgia moderna, onde estabilidade e previsibilidade são critérios fundamentais para competitividade, essa modernização representa um avanço significativo.

### 4.3 Quantidade de Placas

O dimensionamento adequado das placas de resfriamento é crucial para garantir a integridade estrutural do forno e a eficácia do sistema de dissipação térmica. A quantidade e a disposição dessas placas são calculadas com base em uma série de parâmetros, incluindo a carga térmica, a geometria do forno e as propriedades do material utilizado.

Após uma análise técnica aprofundada, foi determinado que o uso de painéis de refrigeração no forno deveria priorizar tanto a eficiência térmica quanto a facilidade de manutenção estrutural e de substituição. Inicialmente, foram projetados oito painéis de refrigeração. No entanto, após revisões detalhadas da estrutura do forno e considerações sobre a eficiência do sistema de troca térmica, o número foi revisado para dez painéis. Por fim, decidiu-se pela implementação de doze painéis refrigerados, Figura 17, o que trouxe uma série de benefícios técnicos.

Figura 17 – Painéis de refrigeração.



Fonte: Autoria própria.

Com a adição de mais painéis, aumentou-se a quantidade de tubos de refrigeração, permitindo uma maior capacidade de absorção de calor gerado durante o processo de fusão do aço no FEA. Isso resultou em um sistema de troca térmica mais eficaz, reduzindo o risco de superaquecimento e garantindo uma operação mais estável e segura do forno. A presença de doze painéis também possibilitou a utilização de painéis menores, o que facilita significativamente o processo de manutenção. A modularidade do sistema permite que, em caso de necessidade de manutenção ou troca de um painel, seja possível remover apenas a parte superior do forno, a abóbada, e em seguida substituir o painel específico de forma rápida e prática, minimizando o tempo de inatividade do equipamento.

Além disso, a configuração com mais painéis reduz a concentração de calor em áreas específicas, distribuindo de maneira mais uniforme a carga térmica nas paredes do forno. Isso não apenas melhora a durabilidade dos painéis, mas também prolonga a vida útil do revestimento interno do forno, contribuindo para a redução dos custos operacionais a longo prazo.

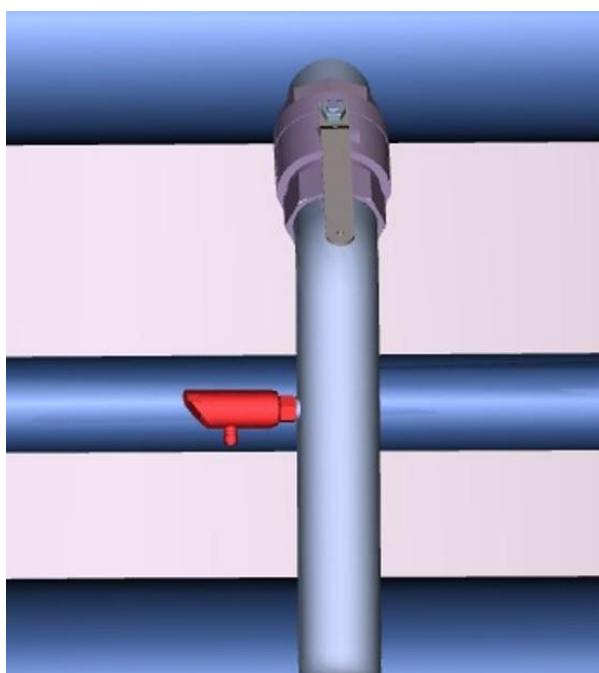
#### 4.4 Projetos de Instrumentação

O desenvolvimento de projetos de instrumentação demanda uma integração precisa entre sensores de campo, sistemas de controle e arquitetura de automação industrial. Essa integração é fundamental para assegurar a operação segura, confiável e eficiente do equipamento, permitindo o monitoramento contínuo de variáveis críticas do processo.

Com esse objetivo, foi elaborado um diagrama P&ID, detalhando a disposição dos instrumentos de medição ao longo da planta do forno. O P&ID serve como base técnica para orientar o posicionamento e a lógica de conexão dos sensores, além de oferecer suporte à manutenção e à calibração durante a operação.

Considerando a atualização do sistema de refrigeração, que passou a contar com 12 painéis refrigerados a água, em substituição aos 8 originalmente previstos, relatado na subseção anterior, houve um redimensionamento na quantidade de sensores de temperatura necessários. No total, foram especificados 18 transmissores de temperatura modelo TA2105 da IFM representados também em 3D na Figura 18.

Figura 18 – Transmissor na tubulação em 3D.

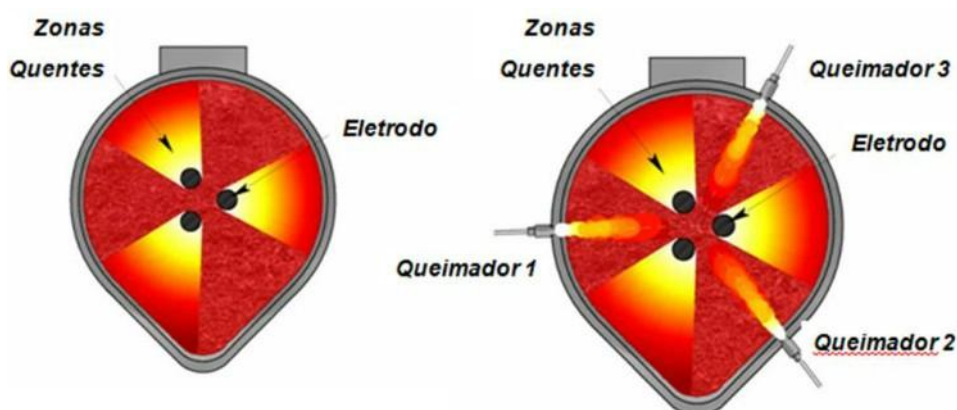


Fonte: Autoria própria..

Antes de distribuir os sensores devemos considerar um aspecto crucial da operação do FEA que seria a presença das chamadas zonas quentes, ou hot spots. Essas regiões são caracterizadas por concentrações elevadas de calor, onde o fluxo térmico é significativamente maior em comparação com outras partes da estrutura do forno. A presença dessas zonas impõe demandas severas sobre os materiais estruturais e, principalmente, sobre os sistemas de refrigeração, exigindo estratégias de controle térmico altamente eficientes (ALMEIDA, C., 2024).

Um dos principais locais onde essas regiões se formam é entre os eletrodos de grafite, durante a formação e manutenção dos arcos elétricos. O arco, sendo a principal fonte de calor do FEA, gera temperaturas que podem ultrapassar 5.000°C, impactando diretamente os componentes metálicos e os painéis refrigerados próximos. E junto ao eletrodos estão os queimadores e injetores de oxigênio, que são responsáveis por fornecer energia térmica adicional ao processo através da queima de gás ou da oxidação controlada de carbono e metais. Nessa zona de impacto, os jatos de oxigênio e chamas provocam variações intensas na temperatura e podem causar o fenômeno conhecido como rebote de chamas, o que intensifica o desgaste por abrasão e erosão térmica, especialmente nos painéis posicionados nessas áreas como na Figura 19.

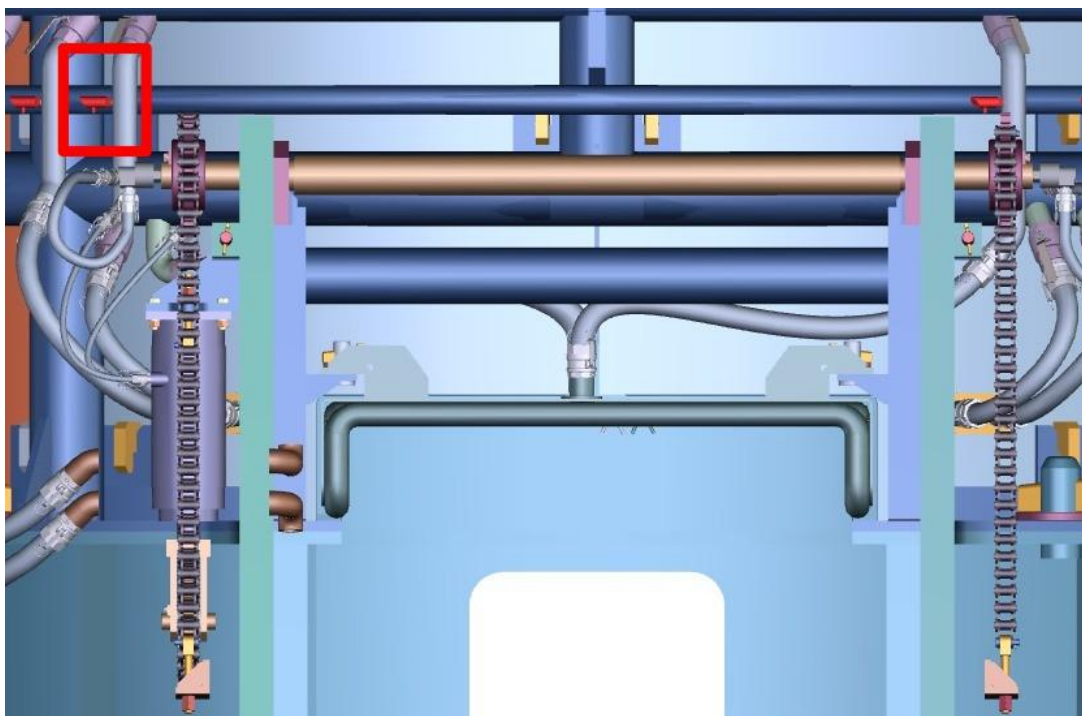
Figura 19 – Zonas quentes.



Fonte: ALMEIDA, C., 2024.

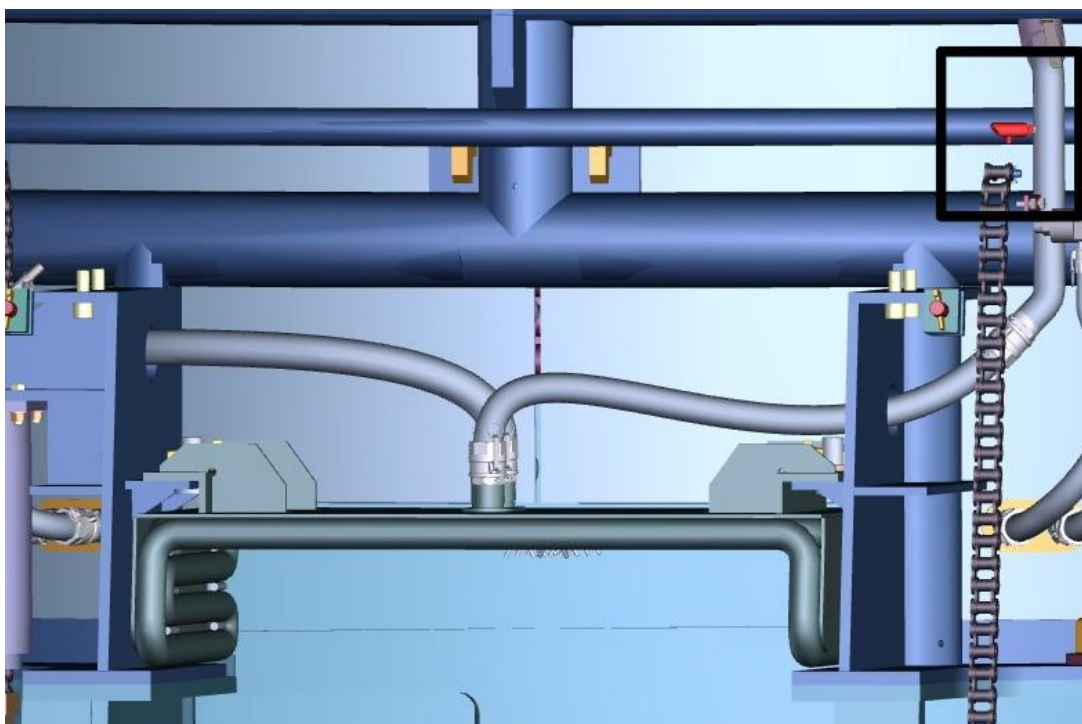
Diante desses desafios, é indispensável reforçar o monitoramento e o controle térmico nas regiões onde os painéis refrigerados estão posicionados nas zonas quentes fazendo se necessário a distribuição mais precisa de sensor por painel que esteja no hot spot. Tendo em mente as zonas quentes, a distribuição dos sensores foi planejada da seguinte forma: serão posicionados três transmissores dedicados ao monitoramento térmico das regiões do cilindro e eixo representado pela cor vermelha na Figura 20, túnel de vazamento representado pela cor preta na Figura 21 e porta de escória representado pela cor verde na Figura 22, com um sensor atribuído a cada uma dessas áreas críticas.

Figura 20 – Cilindro e eixo.



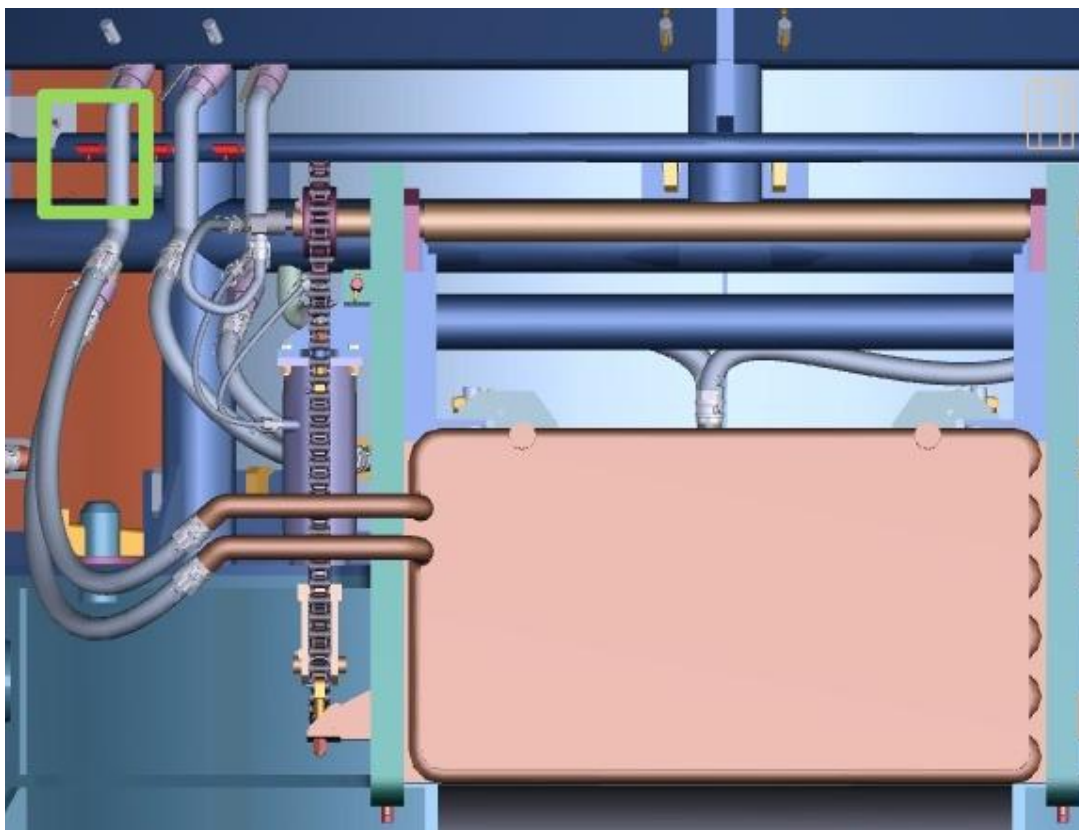
Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Túnel do FEA.



Fonte: Autoria própria.

Figura 22 – Porta de escória.



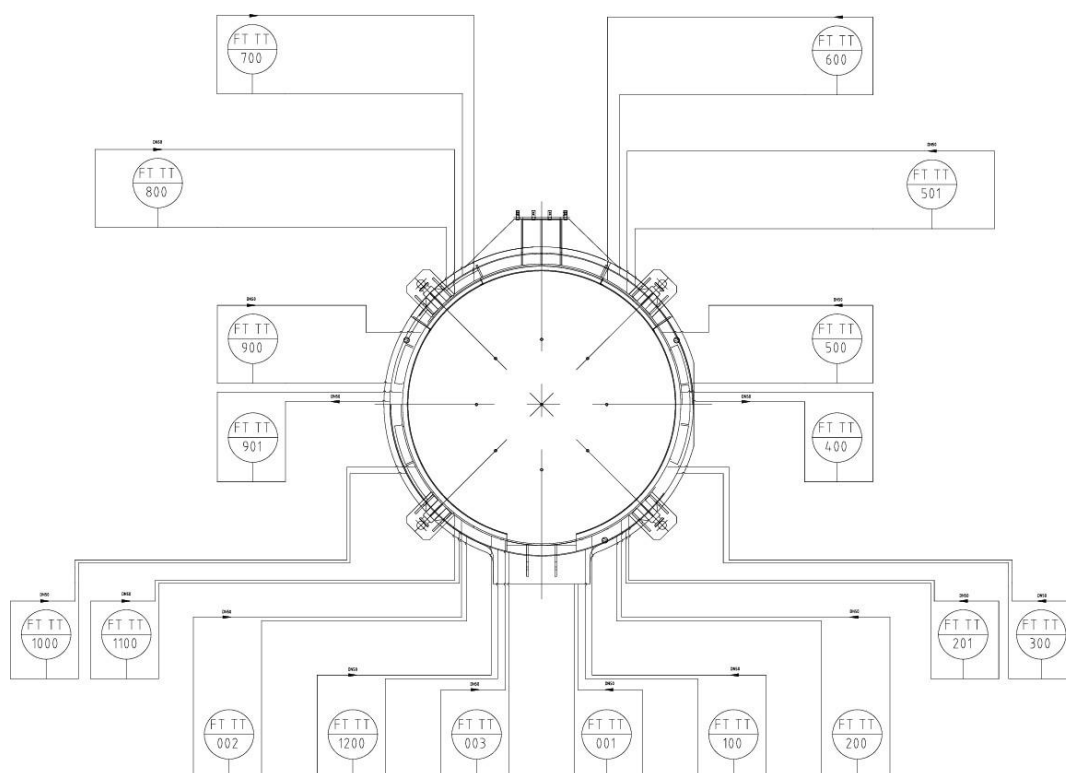
Fonte: Autoria própria.

Os 15 transmissores restantes foram alocados nos 12 painéis de refrigeração, com a maioria (9 painéis) recebendo um transmissor por painel. No entanto, para garantir maior controle térmico em regiões de maior concentração térmica ou fluxo de calor, hot spot, os painéis 2, 5 e 9 foram projetados para receber dois sensores cada, totalizando os 15 dispositivos.

Com base na análise das diretrizes estabelecidas pela norma ISA S5.1 – Instrumentation Symbols and Identification, que padroniza a simbologia e identificação de instrumentos em diagramas P&ID, foi elaborado um sistema de codificação para os instrumentos utilizados no projeto com o foco de garantir clareza na interpretação do diagrama, facilitar a manutenção e inspeção, além de permitir rastreabilidade durante a operação e eventuais expansões do sistema.

O diagrama P&ID apresentado na Figura 23 representa, em visão superior, a distribuição espacial desses instrumentos, oferecendo uma referência para a operação do sistema de instrumentação.

Figura 23 – Diagrama P&amp;ID.



Fonte: Autoria própria.

No projeto acima, foram adotadas as siglas FT TT, seguidas de um código numérico específico para cada instrumento. A sigla FT corresponde a Flow Transmitter, ou Transmissor de Vazão, dispositivo responsável por medir e transmitir, eletronicamente, a taxa de vazão do fluido refrigerante que circula nos painéis. Já a sigla TT se refere a Temperature Transmitter, ou Transmissor de Temperatura, responsável por monitorar e transmitir a temperatura em pontos estratégicos do sistema.

O código de identificação completo segue o seguinte padrão: [XXYY], onde:

- XX representa o número do painel de refrigeração ao qual o instrumento está associado;
- YY indica a sequência numérica do instrumento, iniciando a contagem em 00 para o primeiro sensor do painel, e progredindo conforme a adição de sensores no mesmo módulo.

Por exemplo, o código 'FT TT 500' indica um Transmissor de Vazão e de Temperatura instalado no painel 5 do forno, sendo o primeiro sensor atribuído a esse painel. Fazendo com que o próximo código do sensor seja 'FT TT 501' e assim seguiria a contagem em caso de mais um sensor no painel 5. Esse modelo de codificação permite organizar logicamente os dispositivos dentro do diagrama e garante uma visualização rápida do local de instalação e da função de cada instrumento.

## 4.5 Meios de Comunicação

Os meios de comunicação empregados em fornos elétricos a arco desempenham um papel estratégico na integração e sincronização de suas diversas funções operacionais. Em um ambiente industrial de alta complexidade e criticidade, como o da aciaria, a eficiência na troca de informações entre sensores, atuadores e sistemas de supervisão é essencial para garantir a precisão dos controles, a segurança da operação e a qualidade do produto final. Para isso, são utilizadas redes industriais com protocolos de comunicação robustos, capazes de operar sob condições adversas, como altas temperaturas, vibrações e interferências eletromagnéticas.

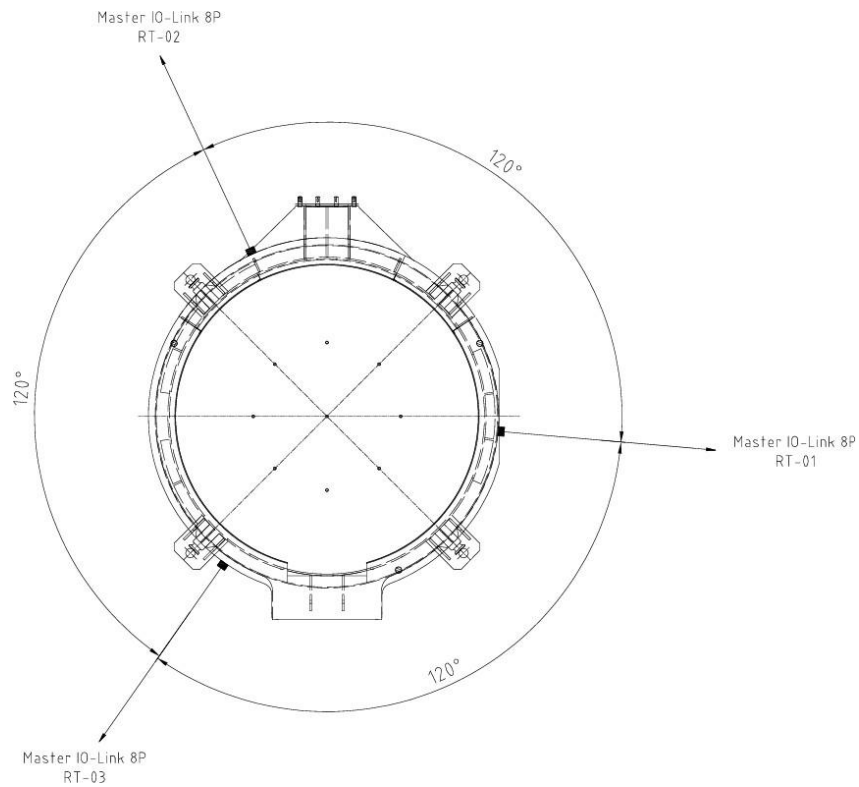
Essas redes são organizadas de forma a permitir uma comunicação bidirecional entre os dispositivos de campo e os sistemas de controle centralizado. Nesse contexto, a interface IO-Link tem se destacado como uma solução moderna e eficiente, permitindo que instrumentos de medição inteligentes, como transmissores de vazão e temperatura, comuniquem-se diretamente com os sistemas de automação de maneira padronizada e com alta confiabilidade.

Neste projeto, foi implementado 3 módulos IO-Link Master IFM AL1303, que atuam como um elo de comunicação entre os dispositivos de campo (transmissores) e o controlador principal. Esses módulos permitem a leitura e escrita de dados em tempo real, além de oferecerem diagnósticos detalhados dos sensores conectados, possibilitando ações proativas de manutenção e ajuste fino no processo de refrigeração. A escolha deste dispositivo se deve à sua compatibilidade com o ambiente industrial severo do forno, além da facilidade de integração com redes como PROFINET ou EtherNet/IP.

A distribuição dos módulos foi organizada de forma a igualizar a distância ao longo da circunferência do forno, garantindo simetria e eficiência na disposição dos IO-Link. Como foram utilizados três módulos, cada um foi posicionado com um ângulo de 120° entre si, assegurando uma cobertura uniforme e balanceada em torno da estrutura do FEA.

A Figura 24 apresenta uma visão superior do forno, destacando a localização precisa de cada IO-Link Master, de acordo com o critério geométrico adotado para otimizar o cabeamento e a comunicação entre os sensores distribuídos nos painéis de refrigeração.

Figura 24 – Distribuição do IO-Link Master.



Fonte: Autoria própria.

A comunicação por IO-Link se mostrou particularmente vantajosa, pois fornece dados digitais com elevada precisão e elimina erros de conversão que ocorrem em sinais analógicos convencionais. Isso possibilita um controle mais apurado da temperatura e da vazão nos circuitos de resfriamento dos painéis do forno, os quais são essenciais para mitigar os efeitos das zonas de calor intenso, especialmente nas áreas entre os eletrodos e próximas aos queimadores.

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho, foi desenvolvido um estudo sobre a refrigeração aplicada ao painel do forno elétrico a arco, considerando sua importância estratégica na preservação dos componentes, na estabilidade térmica e na segurança operacional do sistema. O foco principal esteve na análise do comportamento térmico nas zonas críticas do forno e na integração de soluções tecnológicas que proporcionassem maior eficiência na troca de calor.

Inicialmente, foi realizada uma análise do forno existente, que possuía paredes refratárias. Constatou-se que, devido às temperaturas elevadas e à baixa eficiência na troca térmica, ocorria acúmulo excessivo de calor, comprometendo a durabilidade dos componentes e aumentando os riscos operacionais. Diante desse cenário, tornou-se necessária a substituição parcial do sistema por painéis refrigerados a água, de forma a garantir uma troca térmica mais eficaz e contínua.

Durante o processo de projeto, um ponto crítico foi a definição da quantidade e do tamanho dos painéis refrigerados. Optar por um número reduzido de painéis resultaria em dimensões maiores, dificultando a manutenção e a substituição em caso de falhas. Por isso, após análises técnicas e revisões estruturais, o projeto evoluiu de oito para doze painéis refrigerados. Essa configuração não apenas reduziu o tamanho individual de cada painel, mas também aumentou a quantidade de pontos de troca térmica atuando simultaneamente, melhorando a eficiência do sistema.

Outro aspecto relevante foi o aterramento, considerado essencial para a segurança elétrica, mesmo em regiões que, teoricamente, já estariam interligadas. Optou-se por projetar um sistema de aterramento redundante, assegurando que a conexão elétrica fosse confiável e contínua em qualquer condição operacional, minimizando riscos de falha de isolamento.

A partir da instrumentação dedicada ao monitoramento de variáveis como temperatura e vazão, foi possível implementar um sistema de supervisão baseado em comunicação industrial robusta, utilizando o protocolo IO-Link IFM AL1303. A escolha dos instrumentos foi estratégica: os sensores de temperatura PT100, associados à integração IO-Link com conexão Profinet no módulo de I/O, permitiram leituras precisas e contínuas, garantindo que os dados fossem transmitidos em tempo real para o CLP, melhorando significativamente a resposta do sistema diante de condições críticas.

Os resultados obtidos demonstram ganhos significativos no desempenho térmico do sistema de refrigeração, com destaque para a homogeneização da dissipação de calor, redução dos riscos de superaquecimento e prolongamento da vida útil dos componentes eletrificados e estruturais do forno. A confiabilidade aumentada na comunicação entre sensores e CLP contribuiu diretamente para uma operação mais segura, eficiente e controlada.

Conclui-se, portanto, que o emprego de uma estrutura de automação bem projetada, aliada ao monitoramento contínuo da refrigeração, é fator determinante para o sucesso operacional no FEA. Mais do que apenas controlar variáveis, o sistema implementado atua de forma preventiva e

inteligente, antecipando falhas e otimizando o desempenho térmico. Este trabalho, assim, reforça a importância da refrigeração industrial como elemento central na eficiência e na longevidade de equipamentos submetidos a condições extremas, e abre caminhos promissores para o uso crescente de tecnologias inteligentes na indústria siderúrgica.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Uma proposta particularmente promissora consiste no desenvolvimento de um projeto de painel refrigerado com o conceito de “double size”, ou seja, com o dobro da capacidade de refrigeração e área de cobertura porém com o foco em tempo de vida e absorção. Essa iniciativa visa mitigar as limitações atuais associadas aos pontos quentes, proporcionando maior robustez térmica e diminuindo o desgaste dos componentes metálicos do forno. Tal painel permitiria uma dissipação de calor mais eficiente nas zonas de maior incidência térmica, reduzindo paradas não programadas e aumentando a vida útil do equipamento.

Outro avanço possível está na digitalização do sistema de controle, com a implantação de gêmeos digitais (digital twins) para simulação do comportamento térmico do forno em diferentes cenários de operação utilizando a inteligência artificial ao seu favor. Isso viabilizaria ajustes preditivos e análises de performance para antecipar falhas ou otimizar os parâmetros de operação.

Por fim, pode-se estudar a aplicação de materiais avançados nos painéis refrigerados com revestimentos resistentes à corrosão e abrasão, melhorando ainda mais a confiabilidade estrutural desses componentes essenciais ao bom funcionamento do forno elétrico a arco. Essas iniciativas ampliam os horizontes técnicos do projeto e representam um caminho sólido para a continuidade do estudo iniciado.

## REFERÊNCIAS

- [1] BRUCH, R. Estudo das perdas térmicas de painéis entre o vazamento no forno elétrico à arco e o transporte para o forno-painel. 2012. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/60805>>. Acesso em: 1 agosto 2024.
- [2] WANDEKOKEN, T. Artigo: Análise da adição de gusa líquido em fea através de dados operacionais e de balanço térmico. 1. ed. Vitória, 2014. Acesso em: 9 setembro 2024.
- [3] CHINAIDER, K. Aplicação da ferramenta masp para redução do consumo de areia ebt no forno elétrico a arco de uma siderúrgica. 2017. Disponível em: <<https://www2.ufjf.br/engenhariadeproducao/files/2016/12/KLISSIAN-CHINAIDER-DOS-REIS-VERS%C3%83O-FINAL.pdf>>. Acesso em: 1 agosto 2024.
- [4] ALMEIDA, C. Aciaria News: Forno Elétrico a Arco (FEA). 2012. Disponível em: <<https://aciarianews.blogspot.com/2012/12/forno-eletrico-arco-fea.html>>. Acesso em: 1 agosto 2024.
- [5] IFM. IO-Link master with Profinet interface AL1303 IO-Link Master DL PN 8P IP69K. Disponível em: <<https://www.ifm.com/us/en/product/AL1303>>. Acesso em: 1 agosto 2024.
- [6] IFM. Transmissor de temperatura TA2105 TA-025CLER14-A-ZVG/US. Disponível em: <<https://www.ifm.com/us/en/product/AL1303>>. Acesso em: 1 agosto 2024.
- [7] MARANHÃO, E. Artigo: Introdução ao processo de Forno. 2014. Disponível em: <<https://eam2016freelancer.wixsite.com/edilsonalvesmaranhao/artigo-introducao-ao-processo-de-fo-1>>. Acesso em: 1 agosto 2024.
- [8] WANDEKOKEN, T; COUTINHO, P; GUIMARÃES, J; COSTA, C; CERQUEIRA, J. Aumento da confiabilidade operacional e disponibilidade do fea da votorantim resende através do uso das tecnologias double side e protect block. 1. ed. Rio de Janeiro, 2015. Acesso em: 1 agosto 2024.
- [9] JOHN, A. Artigo: Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco. 1. ed. Porto Alegre, 2009. Acesso em: 1 agosto 2024.
- [10] EOXS. Advancements in Electric Arc Furnace Technology: What's on the Horizon? 2024. Disponível em: <[https://eoxs.com/new\\_blog/advancements-in-electric-arc-furnace-technology-whats-on-the-horizon/](https://eoxs.com/new_blog/advancements-in-electric-arc-furnace-technology-whats-on-the-horizon/)>. Acesso em: 10 de maio 2025.
- [11] ZB Metaltech. Water-Cooled Panels. 2024. Disponível em: <<https://www.zbmetaltech.com/products/water-cooled-panels/>> . Acesso em: 10 de maio 2025.
- [12] TEMELEC. Tipo Q2A. Disponível em: <<https://www.temelec.com.mx/wp/product/tipo-q2a/>>. Acesso em: 10 de maio 2025.

- [13] YONMO, S; SANGYOUN, L; KYUNGMOON, H; JADUCK, K; SEONGJAE, L; DOYOUNG, J; CHANGYONG, O; ANDBYUNGHWA, J. Artigo: Improvement of Energy Efficiency and Productivity in an Electric Arc Furnace through the Modification of Side-Wall Injector Systems. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9717/8/10/1202>>. Acesso em: 10 de maio 2025.
- [14] CHUNG-HYOK, O; KWANG-HYOK, S; SONG-HUA, C; JONG-MUN, R; SONG-II, R. Artigo: Design of a Water-Cooling System for the Inside Roof of 20t Electric Arc Furnace for Oxygen Blow Decarburization Using CFD Analysis. 2024. Disponível em: <<https://journals.stmjournals.com/jotea/article%3D2024/view%3D184009/>>. Acesso em: 10 de maio 2025.
- [15] WANDEKOKEN, T. Painéis Refrigerados do FEA Conceitos Básicos de Operação e Manutenção. Disponível em: <[https://www.abmbrasil.com.br/meus-arquivos/Apresentacao\\_webinar\\_30-06\\_Paineis\\_Refrigerados\\_do\\_FEA.pdf](https://www.abmbrasil.com.br/meus-arquivos/Apresentacao_webinar_30-06_Paineis_Refrigerados_do_FEA.pdf)>. Acesso em: 1 agosto 2024.
- [16] WANG, Y. Artigo: NUMERICAL MODELING OF THE METAL MELTING UTILIZING A DC ELECTRIC ARC PLASMA FOR ELECTRIC ARC FURNACE. 2019. Disponível em: <<https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI30502807/>>. Acesso em: 15 de junho 2025.
- [17] PRETORIUS, E; OLTMANN, H. EAF Fundamentals: Charging, melting and refining. Disponível em: <<https://doczz.net/doc/4785168/eaf-fundamentals-charging-melting-and-refining>>. Acesso em: 15 de junho 2025.
- [18] Ferreira L. Forno Elétrico a Arco (FEA). 2011. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/10152186/>>. Acesso em: 15 de junho 2025.